

1 9 6 3
Nr 1 (6)

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA — MIĘDZESZYN

PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI



BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności
Nr _____



MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

ROK 3

WARSZAWA 1963

1/6/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Ośrodek Informacji Techniczno-Ekonomicznej

Kolegium Redakcyjne:

Przewodniczący - mgr inż. Zenon Szpigler
Z-ca Przewodniczącego - mgr inż. Władysław Cetner

Członkowie:

inż. Edmund Janowski, doc. Stefan Jasiński
mgr Kazimierz Kotowski, mgr inż. Adam Moniuszko,
mgr inż. Józef Możejko

Sekretarz Redakcji: Irena Kulko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Ośrodek

Informacji Techniczno-Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH REKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy OKW Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 450. Druk ukończono
w czerwcu 1963 r.

PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

TREŚĆ

J. ZYGIEREWICZ - Nowoczesne systemy łączności radiowej

**BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności**

Nr _____

Mgr inż. Janusz Zygierewicz

NOWOCZESNE SYSTEMY ŁĄCZNOŚCI RADIOWEJ

1. ŁĄCZNOŚĆ RADIOWA W OBECNEJ DOBIE

Łączność radiowa jest w obecnym świecie jednym z podstawowych środków przesyłania informacji. Konkuruje ona z powodzeniem pod względem technicznym i ekonomicznym z systemami łączności przewodowej, a w wielu przypadkach jest jedynym sposobem utrzymywania łączności między oddalonymi obszarami na powierzchni Ziemi, nie mówiąc już o łączności z pojazdami kosmicznymi i innymi obiektami w przestrzeni kosmicznej, gdzie pozycja fal radiowych jako jedynego środka przesyłania informacji nie jest w ogóle zagrożona. Trudno byłoby sobie wyobrazić dzisiejszy świat i jego cywilizacyjny rozwój bez łączności radiowej. Stacje rozgłaszania radiowego pozwalają na odbiór informacji i programów kulturalno-rozrywkowych na całym obszarze kuli ziemskiej, a zasięgi stacji telewizyjnych obejmują większość obszarów cywilizowanych krajów. Radiowe sieci telekomunikacyjne służą do utrzymania łączności telefonicznej, telegraficznej, przesyłania danych liczbowych, obrazów faksymile itd. na obszarach poszczególnych kontynentów oraz spełniają nie mniej ważną rolę przy łączności między tymi kontynentami. Poza siecią służb stałych istnieje szeroko rozwinięta łączność ruchoma służb specjalnych

dla potrzeb wojskowych i cywilnych. Umożliwia ona między innymi sprawne funkcjonowanie tak w obecnym czasie rozwiniętej komunikacji lotniczej i morskiej, przy czym fale radiowe służą w tych przypadkach nie tylko do utrzymania łączności ale i do celów radiolokacji.

Nie oznacza to oczywiście, że łączność radiowa usunęła w cień łączność przewodową i że należy ją zawsze i wszędzie wykorzystywać. Przeciwnie, projektant sieci łączności w każdym konkretnym przypadku przeanalizowuje sprawę w możliwie szerokim aspekcie technicznym i ekonomicznym i dopiero następnie, postępując w sposób obiektywny, wybiera najbardziej właściwy sposób przesyłania na danej trasie określonego rodzaju informacji. Tym niemniej nie ulega wątpliwości, że w wielu systemach łączności fale radiowe zaczynają mieć rolę przodującą i rola ta, w miarę wzrostu potrzeb i możliwości ich technicznej realizacji, będzie niewątpliwie wzrastać. Odnosi się to zresztą nie tylko do zagadnień łączności, ponieważ wykorzystywane dotychczas głównie, jako środek przesyłania informacji, fale elektromagnetyczne zaczynają być w coraz szerszym zakresie stosowane w wielu dziedzinach nauki i nowoczesnej techniki.

Do okresu drugiej wojny światowej przez różne rodzaje służb łączności na powierzchni Ziemi były wykorzystywane praktycznie tylko fale długie, średnie i krótkie oraz w bardzo małym zakresie fale ultrakrótkie /tablica 1/.

T a b l i c a 1

Nazwa	Zakres częstotliwości	Zakres długości fal
Fale bardzo długie	10 - 100 kHz	30 - 3 km
Fale długie	100 - 500 kHz	3000 - 600 m
Fale średnie	0,5 - 2 MHz	600 - 150 m
Fale krótkie	3 - 30 MHz	100 - 10 m
Fale ultrakrótkie	30 - 300 MHz	10 - 1 m
Mikrofale	0,3 - 30 GHz	1 m - 1 cm

gdzie: kHz = 10^3 Hz; MHz = 10^6 Hz; GHz = 10^9 Hz

W czasie drugiej wojny światowej zwiększyło się zastosowanie fal ultrakrótkich oraz rozpoczęło wykorzystywanie mikrofal. Te ostatnie były początkowo wykorzystywane do celów radiolokacji, a następnie również do łączności szerokopasmowej na liniach radiowych. Za pomocą tych fal, przy wykorzystaniu wielokrotnej retransmisji przez stacje przekaźnikowe położone od siebie w odległości widzialności optycznej, utrzymuje się obecnie szeroko rozwiniętą łączność na obszarze poszczególnych kontynentów, a zwłaszcza Europy i Ameryki Północnej. Dzięki wielkiej częstotliwości roboczej pozwalają one na przesyłanie szerokich pasm, odpowiadających kilku sygnałom kanałów telewizyjnych lub sygnałom przeszło 1000 kanałów telefonicznych. Ostatnio wiele się pisze i robi w celu rozwoju szerokopasmowej łączności mikrofalowej przy wykorzystaniu rozproszenia tych fal w troposferze, co

pozweili na uzyskanie bezpośredniej łączności na bardzo duże odległości, umożliwiając przesyłanie wielu informacji do miejsc, gdzie było to dotychczas niemożliwe, a przynajmniej bardzo utrudnione.

Ale w obecnym stanie rzeczy rozwojowi łączności radiowej grozi niezamierzone zahamowanie. Bardzo szybki wzrost sieci łączności radiowej przy zachowaniu dotychczas wykorzystywanego zakresu fal elektromagnetycznych doprowadził do nadmiernego zagęszczenia tego zakresu, tak że mimo najbardziej rygorystycznie stosowanego rozdziału fal nieuniknione jest wspólne wykorzystywanie tych samych częstotliwości pracy przez oddalone od siebie geograficznie różne sieci telekomunikacyjne, co stwarza niebezpieczeństwo powstawania interferencji. Dodatkowo interferencje te powstają zawsze na skutek niezbyt ścisłego przestrzegania przyjętego rozdziału częstotliwości oraz niedostatecznej stałości częstotliwości nadajników stacji radiowych. A potrzeby są olbrzymie i stale rosną. Dość powiedzieć, że na samym terenie Stanów Zjednoczonych pracuje w chwili obecnej kilka milionów nadajników różnych służb. Tak więc dalszemu rozwojowi służb łączności radiowej staje na przeszkodzie bynajmniej nie brak potrzeb i nieznanomość sposobów ich technicznego zaspokojenia, lecz niemożność dalszego już zagęszczania tak stosunkowo wąskiego zakresu fal radiowych.

Dotychczas wyłącznie wykorzystywany zakres fal radiowych posiadał ponadto szereg innych niedogodności dla różnych rodzajów systemów łączności. Przede wszystkim stosunkowo długie fale tego zakresu dla skupiania ich w

wąską wiązkę promieniowania wymagają stosowania anten o bardzo dużych wymiarach. Kierunkowe promieniowanie jest w przypadku służb telekomunikacyjnych na ogół bardzo pożądanym, po pierwsze pozwala dzięki zyskowi anten na poważne zmniejszenie tak kosztownej i trudnej do uzyskania mocy nadawania, a po drugie wpływa w dużym stopniu na zmniejszenie interferencji między różnymi stacjami i zwiększa tajność korespondencji. Te wady uwydatniły się jeszcze wyraźniej przy powstawaniu sieci łączności między poszczególnymi obszarami powierzchni Ziemi za pośrednictwem sztucznych satelitów oraz w związku z potrzebą dwukierunkowej łączności z obiektami /pojazdy kosmiczne, w przyszłości zapewne i planety/ znajdującymi się w przestrzeni kosmicznej. W tym zwłaszcza przypadku, ze względu na odległości wynoszące wiele milionów kilometrów, łączność przy wykorzystaniu dotychczas stosowanego zakresu fal byłaby bardzo trudna do realizacji /zwłaszcza dla kierunku pojazd kosmiczny - Ziemia/, ponieważ mała kierunkowość promieniowania anten o ograniczonych wymiarach wymagałaby stosowania bardzo dużej mocy nadawania, nawet przy wykorzystaniu fal zakresu mikrofalowego.

2. ZAKRES FAL KRÓTSZYCH OD FAL RADIOWYCH

Zakresem fal elektromagnetycznych, który interesował specjalistów łączności już od dawna, a którego praktyczne wykorzystanie stało się całkowicie realne wraz z wynalezieniem odpowiednich urządzeń do generacji i wzmacnia-

nia tych fal, jest zakres fal świetlnych. Można przyjąć, że początkowo badaniami w tej dziedzinie kierowała w równej mierze tak chęć wykorzystania tych fal jako środka przenoszenia informacji, jak i naukowe pragnienie poznania właściwości tego zakresu. Jest jednak rzeczą niewątpliwą, że z chwilą przeprowadzenia pierwszych prób łączności za ich pomocą sprawa przestała być przedmiotem naukowych spekulacji, a stała się sprawą techniczno-ekonomiczną. Służbom łączności na falach radiowych przestała grozić możliwość zahamowania rozwoju na skutek niemożności poszerzenia użytecznego do celów łączności zakresu tych fal i dalszy rozwój służb łączności, przy wykorzystaniu fal krótszych od dotychczasowego zakresu fal radiowych, jest tylko kwestią opracowania zadowalających pod względem technicznym i ekonomicznym metod ich wytwarzania, przesyłania i wykrywania. Można powiedzieć bez przesady, że stwierdzenie możliwości wykorzystawania fal świetlnych do przesyłania szerokopasmowych sygnałów jest w dziedzinie łączności epokowym krokiem naprzód, równym nieomal pierwszemu wykorzystaniu do tego celu fal radiowych, i jest odpowiedzią twórców systemów łączności bezprzewodowej na coraz bardziej krytyczny problem zagęszczenia zakresu fal radiowych.

Fale świetlne obejmują zakres fal o długościach od 100μ do $0,5 \mu$. Fale te dzielą się na trzy podzakresy: fale podczerwone, fale świetlne widzialne i fale nadfioletowe /tablica 2/. W praktyce jednak przyjęło się nazywać falami świetlnymi tylko fale dostępne nam dzięki zmysłowi wzroku, tzn. fale o długościach od $0,76 \mu$ do

0,3 μ , tak że mówiąc o falach świetlnych będziemy mieli na myśli zasadniczo tylko ten wąski zakres. Natomiast nazwy: fale podczerwone i fale nadfioletowe rezerwujemy dla pozostałych zakresów fal.

T a b l i c a 2

Nazwa	Zakres częstotliwości	Zakres długości fal
Fale podczerwone	3 - 400 THz	100 μ -0,76 μ
Fale świetlne /widzialne/	395 - 1000 THz	0,76 μ -0,3 μ
Fale nadfioletowe	750 - 6000 THz	0,3 μ -0,05 μ

Długości widzialnych fal świetlnych odpowiadające poszczególnym prążkom widma, czyli barwom, są następujące:

T a b l i c a 3

Prążek widma	Długość fali
Czerwony	0,76 μ - 0,69 μ = 7600 A° - 6900 A°
Pomarańczowy	0,69 μ - 0,63 μ = 6900 A° - 6300 A°
Żółty	0,63 μ - 0,55 μ = 6300 A° - 5500 A°
Zielony	0,55 μ - 0,50 μ = 5500 A° - 5000 A°
Niebiesko- -zielony	0,50 μ - 0,48 μ = 5000 A° - 4800 A°
Niebieski	0,48 μ - 0,43 μ = 4800 A° - 4300 A°
Indygo	0,43 μ - 0,40 μ = 4300 A° - 4000 A°
Fioletowy	0,40 μ - 0,30 μ = 4000 A° - 3000 A°

gdzie: THz = 10^{12} Hz; μ = 10^{-4} cm; A° = 10^{-8} cm.

Jak z tej tablicy wynika, nazwa fale nadfioletowe pochodzi od najbliższego sąsiedztwa z falami widzialnymi o barwie fioletu, a fale podczerwone - z falami widzialnymi o barwie czerwieni.

Powyżej zakresu częstotliwości fal nadfioletowych leżą fale rentgenowskie, mające olbrzymie zastosowanie w medycynie dzięki dużej zdolności przenikania przez ciało stałe, dalej promienie gamma, powstające jako produkt rozpadu atomów i wreszcie promienie kosmiczne.

Pomiędzy zakresem fal radiowych a falami podczerwonymi leży zakres fal milimetrowych, który do niedawna nie był w ogóle praktycznie wykorzystywany, a który obejmuje pasmo częstotliwości od około 30 GHz do 3000 GHz. Jest to zakres niezmiernie szeroki, obejmuje bowiem 8 do 10 oktaw i samo wykorzystanie go, nawet bez uwzględnienia zakresu fal świetlnych, mogłoby rozwiązać problem zagęszczenia pasm radiowych na długie jeszcze lata. Dość powiedzieć, że dla celów łączności nie były do tej pory praktycznie wykorzystywane fale krótsze od 3 cm, czyli o częstotliwości 10.000 MHz, a taka częstotliwość to tylko umiarkowane pasmo przy fali o długości 3 mm. Fale te posiadają 10 razy szersze pasmo transmisyjne niż dotychczas użytkowany zakres fal radiowych stojący do dyspozycji wszystkich służb łączności bezprzewodowej. Ze względu właśnie na tę możliwość transmisji szerokich pasm można zauważyć w ostatnich latach większe zainteresowanie tym zakresem oraz próby jego praktycznego wykorzystania. Niestety, jak dotychczas, mimo wielu badań mało uczyniono w kierunku praktycznej

realizacji odpowiednich układów i opracowania właściwych lamp, w każdym bądź razie znacznie mniej niż w przypadku fal podczerwonych, świetlnych i nadfioletowych. Można powiedzieć, że fale milimetrowe są teraz w pozycji zajmowanej 25 lat temu przez fale decymetrowe i centymetrowe i potrzebują nie ulepszeń technologicznych w budowie sprzętu, lecz jakiegoś radykalnego przełomu w technice ich wytwarzania, podobnego do tego, jaki swego czasu spowodowało wprowadzenie zamiast normalnych lamp elektronowych - magnetronów i klistronów.

3. WŁAŚCIWOŚCI FAL KRÓTSZYCH OD FAL RADIOWYCH I WYNIKAJĄCE STĄD MOŻLIWOŚCI ICH PRAKTYCZNEGO WYKORZYSTANIA

Wszystkie wymienione powyżej zakresy fal, a więc fale milimetrowe, podczerwone, świetlne i nadfioletowe, posiadają jedną cechę wspólną, a mianowicie prędkość rozchodzenia się równą prędkości światła, to znaczy 300.000 km/sek. Do zjawiska tego przyzwyczailiśmy się już w przypadku fal świetlnych i radiowych, ale pozornie nie jest ono w zgodzie z właściwościami jednego z powyższych zakresów fal, a mianowicie falami podczerwonymi. Jak wiadomo, fale te, zwane w fizyce również falami cieplnymi, są wytwarzane przez termiczne ruchy cząsteczek w ciele i promieniowane przez wszystkie ciała o temperaturze powyżej zera bezwzględnego, przy czym długość fali, na której następuje najsilniejsze promieniowanie, jest tym mniejsza, im temperatura ciała

wyższą. Jeżeli prędkość rozchodzenia tych fal jest rzeczywiście równa prędkości światła, to dlaczego potrzeba tak długiego czasu, aby na przykład od gorącego pieca rozgrzał się cały pokój? Otóż powodem tego jest zła przewodność powietrza, a nie wolne rozchodzenie się fal podczerwonych. Fale cieplne rzeczywiście rozchodzą się z prędkością światła, gęstość ich mocy spada jednak tak szybko, że nasze zmysły ciepła, ze względu na bardzo małą ich czułość, nie są już w stanie tego odczuć w dużej odległości od źródła. Natomiast nasze organy wzrokowe są wiele milionów razy czulsze i dlatego odbierają promienie świetlne nawet bardzo silnie stłumione "natychmiast" po ich wysłaniu, tak że w tym przypadku doświadczenie naszych zmysłów nie zaprzecza teorii tak wielkiej prędkości rozchodzenia się fal elektromagnetycznych tego zakresu.

Właściwości rozchodzenia się fal podczerwonych i fal nadfioletowych są w wielu przypadkach prawie takie same, jak fal świetlnych, tak że można z tego punktu widzenia rozpatrywać je jako jedną całość. Rozchodzenie się tych fal podlega znanym prawom optyki jak refrakcja, dyfrakcja, interferencje itp. Fale milimetrowe natomiast, jako leżące na pograniczu zakresów, jednymi swoimi właściwościami zbliżone są do fal radiowych, a drugimi do fal świetlnych.

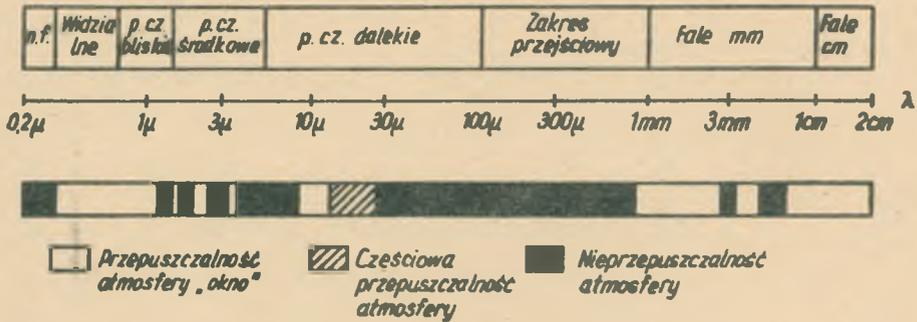
Podstawową wspólną cechą wszystkich fal krótszych od dotychczas użytkowanego zakresu fal radiowych jest prostolinijne rozchodzenie się. Wskutek tego w najlepszych nawet warunkach propagacyjnych, tzn. przy braku prze-

szkód na trasie, zasięg bezpośredni jest ograniczony do odległości widoczności optycznej. Transmisja szerokich pasm na duże odległości jest możliwa tylko na drodze wielokrotnej retranslacji, podobnie jak dzieje się to w przypadku mikrofalowych linii radiowych. Ze względu na krótkość fal działają na nie odbijająco i rozpraszająco nawet najmniejsze przeszkody. Tak więc np. już krople wody o średnicy około 0,1 mm są bardzo duże w porównaniu do tych długości fal i działają jak bardzo małe reflektory. Na skutek tego deszcz i mgła wpływają silnie tłumiąco, promienie fal po wielokrotnym odbiciu ulegają szybkiej absorpcji. Podobnie tłumiąco działa sama atmosfera, a ściślej tlen w niej zawarty. Działanie to jest oczywiście tym silniejsze, im w danych warunkach atmosferycznych fale są krótsze, dlatego też na przykład fale podczerwone lepiej przenikają przez atmosferę niż fale świetlne i dlatego będą prawdopodobnie chętniej stosowane przez służby łączności na powierzchni Ziemi. Fale podczerwone posiadają za to inne wady, są na przykład silniej tłumione przez warstwy szkła niż fale świetlne, dlatego też w zimie przy nasłonecznionym oknie podnosi się w pokoju temperatura. Przechodzące z małym tłumieniem przez szkło widzialne fale świetlne zostają pochłonięte przez różne przedmioty wewnątrz pokoju. Ciążyła te odpromieniowują z kolei uzyskane ciepło w postaci fal podczerwonych, które nie są już wypuszczane przez szyby na zewnątrz i ogrzewają wnętrze pokoju.

Silnie wzrastające tłumienie atmosfery ze zmniejszeniem długości fali jest również powodem, że w górach,

padające promieniowanie słoneczne zawiera procentowo więcej promieni nadfioletowych niż na nizinach. Zjawisko to może być zresztą z pożytkiem wykorzystane do celów łączności. Z chwilą bowiem, kiedy zostaną opracowane odpowiednie układy generacyjne i detekcyjne, łączność na falach nadfioletowych może zapewnić lepszą jakość przesyłania informacji niż przy wykorzystaniu fal podczerwonych lub świetlnych ze względu na mniejsze zakłócenia przez naturalne źródła promieniowania. Powodem tego jest fakt, że w pobliżu powierzchni Ziemi promieniowanie słońca i innych gwiazd jest znacznie "bogatsze" w składowe widma odpowiadające falom podczerwonym i falom świetlnym widzialnym niż nadfioletowym. Ze względu na swą bliskość bardzo dużym źródłem szumów jest też sama powierzchnia "cieplej" ziemi, która posiada temperaturę zaledwie wystarczającą, aby generować szumy o częstotliwościach odpowiadających zakresowi fal podczerwonych.

Należy podkreślić, że własności propagacji w atmosferze fal krótszych od centymetrowych nie zmieniają się bynajmniej liniowo ze zmianą częstotliwości tych fal. Na skutek określonych wymiarów cząsteczek atmosfery oraz ich gęstości istnieje wyraźna selektywność atmosfery, która dobrze przepuszcza jedne zakresy fal, zwane "oknami", a bardzo silnie tłumi inne zakresy. Tablica 4 przedstawia właśnie zmiany własności tłumienia atmosfery, przy dobrej pogodzie, w zależności od długości fali. Dane te otrzymano na podstawie wielu statystycznych pomiarów. Pozwalają one na określenie najodpowiedniejszych zakresów częstotliwości, dla sieci łączności na powierzchni Ziemi oraz łączności Ziemia - obiekt kosmiczny.



n.f. - promieniowanie nadfioletowe

p.cz. - promieniowanie podczerwone

Mimo jednak najważniejszego doboru długości fal - dwie rzeczy są pewne: można zapewnić tylko zasięg optyczny oraz warunki atmosferyczne będą zawsze wywierały bardzo duży wpływ na rozchodzenie się tych fal. Nie jest to tylko przeszkodą dla łączności na duże odległości między pojazdami kosmicznymi, natomiast w przypadku służb łączności na powierzchni Ziemi stwarza duże ograniczenie. Dlatego też poważnie myśli się o przesyłaniu ich nie bezpośrednio, lecz w falowodach o przekroju kołowym. Dla szczególnego rodzaju fali tłumienie takiego falowodu maleje ze wzrostem częstotliwości roboczej oraz ze wzrostem średnicy rury. Zjawisko to trudno wykorzystać przy falach dłuższych, ponieważ wymagane wymiary rury są zbyt duże, ale przy falach milimetrowych, a tym bardziej świetlnych, wystarczy już rura o średnicy kilku lub kilkunastu milimetrów, aby można było przesłać pasmo rzędu dziesiątków tysięcy megacykli.

Tłumienie nie przekraczałoby 2 dB/km, co pozwala na przesyłanie sygnałów bez stacji wzmacniakowych na odległości rzędu kilku dziesiątków kilometrów. Transmisja taka posiada zalety kabla, jeżeli weźmie się pod uwagę ekranowanie od wpływów zewnętrznych oraz zalety łączności radiowej na falach bardzo krótkich w odniesieniu do szerokości transmitowanego pasma. Taka jedna rura falowoda może pozwolić na transmisję ilości informacji większej, niż za pomocą całego obecnie wykorzystywanego zakresu fal radiowych. Zastosowanie takiego sposobu transmisji pozwoliłoby na niesłychanie szybki wzrost sieci łączności i transmisji wielu danych. Niektórzy teoretycy łączności przewidują nawet, że z czasem ten system łączności usunie w cień wszystkie inne systemy. Do każdego mieszkania dochodziłaby wówczas za pośrednictwem odgałęzienia falowodu, przesłana na przykład za pomocą fal podczerwonych, duża liczba różnych informacji, z których użytkownik wybrałby sobie, za pomocą odpowiednich urządzeń, pożądany w danym momencie rodzaj sygnału, np. telewizyjny, radiofoniczny itp.

Realizacja tego wydaje się jednak w najlepszym przypadku dość odległą przyszłością, na razie niewątpliwie fale tych zakresów znajdą zasadniczo zastosowanie do bezpośredniej łączności zwłaszcza ze względu na zapotrzebowanie na te fale przez systemy łączności kosmicznej. Z punktu widzenia potrzeb tych systemów podstawową zaletą fal milimetrowych, a jeszcze bardziej fal krótszych, jest łatwość skupiania ich w wąską wiązkę za pomocą anteny o stosunkowo niewielkich wymiarach, co ma

kolosalne znaczenie ze względu na wymiary, ciężar i łatwość posługiwania się sprzętem oraz pozwala na duże zmniejszenie mocy nadajnika. Dość powiedzieć, że antena paraboliczna o średnicy 50 cm już przy fali o długości 3 mm daje zysk około 50 dB, czyli przy mocy generatora nadajnika 10 mW moc promieniowana w pożądanym kierunku wynosi 1 kW, przy czym szerokość wiązki jest około $1,0^{\circ}$. Ze zwiększeniem częstotliwości zyski anteny bardzo szybko rosną i trzeba już je nawet ograniczyć dlatego, że przy zbyt wąskich wiązkach kierunkowych anten powstają trudności przy nawiązaniu łączności, zwłaszcza gdy jedna ze stacji znajduje się na obiekcie ruchomym. O zalecanych małych wymiarów sprzętu i małych mocach urządzeń w przypadku wszelkiego rodzaju pojazdów, a pojazdów kosmicznych w szczególności, nie ma już nawet co wspominać.

Łączność z pojazdami kosmicznymi należy utrzymywać na falach bardzo krótkich z innego jeszcze powodu. Otóż w czasie lotu wokół rakiety powstaje otoczka plazmowa /najsilniejsza w pierwszym okresie po wystrzeleniu/, która jest nieprzepuszczalna dla fal radiowych o częstotliwościach mniejszych od 50 GHz. Natomiast fale o większych częstotliwościach, a zwłaszcza fale świetlne, podczerwone i nadfioletowe, docierają do powierzchni pojazdu kosmicznego i mogą być wykorzystywane zarówno do celów łączności, jak i radiolokacyjnego prowadzenia, namierzania itp.

W przypadku służb łączności na powierzchni Ziemi wąskie wiązki promieniowania zmniejszają niebezpieczeństwo interferencji z innymi sieciami łączności, a poza tym

utrudniają podstępach. Tajność przesyłania informacji jest zresztą i tak bardzo duża ze względu na trudności określenia przez niepowołane czynniki dokładnej częstotliwości pracy stacji, która ze względu na szerokość zakresu tych fal może zawierać się w bardzo dużych granicach. Łatwość skupienia fal w wąską wiązkę pozwala na zastosowanie ich w precyzyjnych systemach radiolokacyjnych, przy czym w przypadku fal świetlnych i nadfioletowych wykorzystuje się zjawisko odbicia od obserwowanego obiektu /namierzanie aktywne/, a w przypadku fal podczerwonych również zjawisko promieniowania tych fal przez obserwowany obiekt, na przykład silniki samolotu /namierzanie pasywne/.

W dalszych rozdziałach zostaną opisane obecne postępy na drodze technicznego wykorzystania tych fal do celów łączności radiowej.

4. ŁĄCZNOŚĆ NA FALACH MILIMETROWYCH

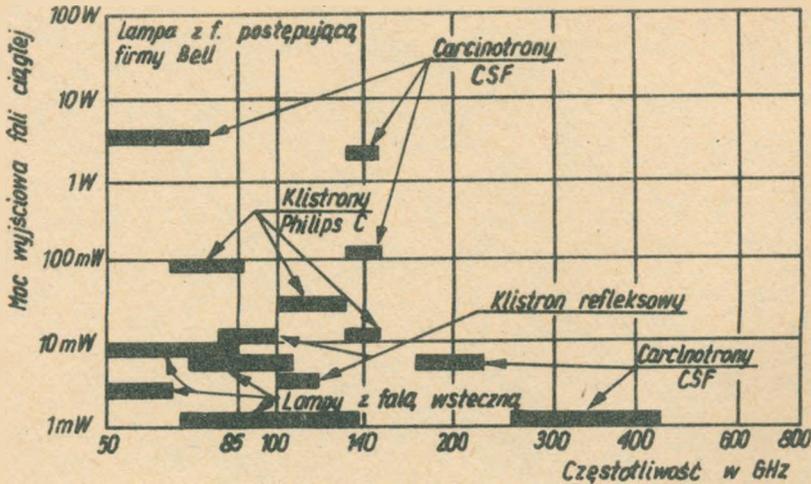
Jest rzeczą dosyć oczywistą jak fale milimetrowe mogą być przesyłane, natomiast jest sprawą otwartą, jak będą one w przyszłości generowane, wzmacniane, modulowane i detektowane. Jak powiedziano, leżą one na pograniczu fal podczerwonych i fal radiowych, z czego wynikają pewne zalety i wady. Zaletą jest to, że są one trochę bardziej "dotykalne" od fal świetlnych. Radiotechnik może mierzyć różne parametry tych fal w sposób zbliżony do metod stosowanych przy pomiarach w zakresie mikrofalowym. Jednakże gdy w przypadku fal krótszych wynalezienie laserów /patrz rozdział 7/ wydaje się być momentem

przełomowym w dziedzinie generacji i wzmacniania tych fal, a znana od dawna fotokomórka spełnia dobrze rolę detektora tego promieniowania, o tyle w zakresie fal milimetrycznych przełomu takiego nie widać i postęp jest oparty raczej na technologicznym ulepszaniu układów stosowanych w zakresie mikrofalowym, a zwłaszcza lamp elektronowych. Trudności w stosunku do celów generacji i wzmacniania tych fal na przykład wzmacniaczy molekularnych wynikają stąd, że dla wzmacniania fal milimetrycznych wzmacniacze te muszą być pompowane falami odpowiednio krótszymi ze źródeł o stosunkowo dużych mocach, a źródeł tych na razie jeszcze właśnie brak. Przewiduje się, że z czasem układy z rodziny maserów pompowane na częstotliwościach fal świetlnych i podczerwonych pozwolą na generację i wzmacnianie fal milimetrycznych, przy szerokościach pasm wielokrotnie przewyższających szerokości uzyskiwane na specjalnie przystosowanych do fal milimetrycznych lampach zakresu mikrofalowego. Są to lampy pracujące w oparciu o wykorzystanie opóźnianej w odpowiednich obwodach fali na strumień elektronów, a więc lampy podobne w działaniu do lamp o fali postępującej lub fali wstecznej. Niestety, przy tak krótkich falach natężenie pola wokół obwodów opóźniania fali maleje bardzo szybko z odległością, tak że jest potrzebny bardzo silny strumień elektronów o gęstości setek kilowatów na centymetr kwadratowy, aby wytworzyć odpowiednio silne wzajemne oddziaływanie. Wymaga to niesłychanie żmudnej konstrukcji mechanicznej oraz stosowania specjalnie wydajnych katod dla wyrzutni elektronowych. To wszystko

sprawia, że sprawność procesów generacji i wzmacniania jest bardzo mała i odstręcza na razie od praktycznego wykorzystywania tych fal do celów łączności,

Mimo trudności i tu zaznacza się ostatnio wyraźny postęp. Prace idą w kierunku przystosowania dotychczas używanych w zakresie mikrofal lamp do pracy na falach milimetrowych oraz wynalezienia zupełnie nowych sposobów wzmacniania i generacji tych fal. Osiągnięcia w tej dziedzinie najlepiej obrazuje tablica 5, podająca częstotliwości pracy i moce wyjściowe różnego typu lamp,

T a b l i c a 5



generujących fale ciągłe lub impulsowe w zakresie milimetrowym. Są to lampy trzech zasadniczych typów, a mianowicie lampy z falą wsteczną /szybkość fazowa ma kierunek odwrotny do szybkości grupowej, czyli przepływu energii/, z falą postępującą /szybkość fazowa i gru-

powa mają ten sam kierunek/ oraz z falą stojącą taką, jaka jest na przykład wytwarzana w rezonatorze wnąkowym klistronu. Jako najwybitniejsze osiągnięcie można wymienić generator na lampie z falą wsteczną, dający moc wyjściową 10 do 20 W przy sprawności 5 do 10% oraz generator na lampie z falą postępującą, na którym można uzyskać 10 W przy sprawności 30%. Przewiduje się udoskonalenie tych lamp tak, że będzie można uzyskać moc 100 do 200 W przy pracy ciągłej na falach w zakresie 1 do 5 mm, a wzmianki w literaturze fachowej donoszą nawet o uzyskaniu tego w warunkach laboratoryjnych.

Należy przy tym podkreślić ten dziwny fakt, że jest obecnie rzeczą technicznie możliwą generacja promieniowania na falach świetlnych o mocy rzędu kilowatów, podczas gdy konstruktorzy muszą czynić olbrzymie wysiłki, aby uzyskać moce około kilku watów na falach o długościach około 1 milimetra. Ponieważ te same zalety w odniesieniu do szerokości transmitowanych pasm, przy równoczesnym już rozwiązaniu podstawowych problemów, generacji i wzmacniania, posiadają fale podczerwone i świetlne, przeto na tych zakresach skupia się obecnie główne zainteresowanie twórców przyszłościowych systemów łączności. Jeżeli zostaną opracowane odpowiednie urządzenia i układy, fale milimetrowe znajdą niewątpliwie szerokie zastosowanie do celów łączności na powierzchni Ziemi i w przestrzeni kosmicznej. Jeżeli jednak sprawa ulegnie opóźnieniu, wówczas prawdopodobnie wykorzystanie zakresu fal milimetrowych zostanie odsunięte na plan dalszy, po zadowalającym opanowaniu techniki łączności na falach podczerwonych, świetlnych i nadfioletowych.

5. ŁACZNOŚĆ NA FALACH PODCZERWONYCH

Historycznie rzecz biorąc pierwsze próby łączności na falach krótszych od mikrofal były prowadzone właśnie przy wykorzystaniu fal podczerwonych. Wystarczy powiedzieć, że już po pierwszej wojnie światowej firma amerykańska General Electric skonstruowała urządzenia nadawczo-odbiorcze, pracujące na falach podczerwonych, które umożliwiały łączność telefoniczną w nocy przy dobrej pogodzie w zasięgu około 10 km. Zainteresowanie przede wszystkim tym zakresem fal było spowodowane tym, że promieniowanie to jest stosunkowo najłatwiejsze do otrzymania, po prostu można je otrzymać przez podgrzewanie do odpowiedniej temperatury ciał, a zwłaszcza ciał czarnych. Ponadto fale te już od dość dawna znajdowały szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki, a wykorzystaniem ich do celów łączności zajęto się dopiero później.

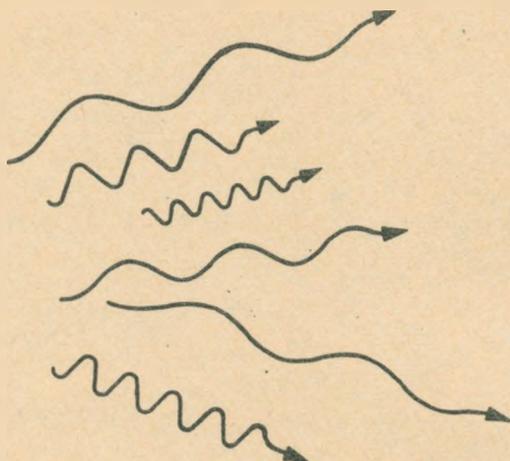
Częstotliwość fali podczerwonej, na której występuje maksymalne promieniowanie, jest zależne od temperatury ciała. Podobnie dzieje się z całkowitą promieniowaną energią fal podczerwonych, która wzrasta proporcjonalnie do czwartej potęgi temperatury absolutnej promieniującego ciała.

Źródła fal podczerwonych stosowane w praktyce są bardzo różnorodne i trudno było by nawet pobieżnie je tutaj wymienić. Ogólnie można je podzielić na źródła temperaturowe, w których promieniowanie powstaje na skutek ogrzewania ciała /np. elektryczne lampy żarowe/ oraz

źródła, w których promieniowanie jest otrzymywane przy wykorzystaniu zjawiska jarzenia, powstającego przy przepływie prądu przez gaz lub pary metali /np. promienniki cezowe/. Do tej ostatniej grupy można również zaliczyć gazowe promienniki impulsowe, wytwarzające okresowo intensywne promieniowanie i z tego względu wykorzystywane zwłaszcza w układach radarowych. Promieniowanie następuje tu dzięki okresowemu rozładowywaniu kondensatora o dużej pojemności, co powoduje w ciągu krótkiego czasu silną jonizację i jarzenie gazu.

Wszystkie tego typu generatory fal podczerwonych odznaczają się jedną podstawową wadą, a mianowicie wytwarzany strumień promieni podczerwonych jest niekoherentny i posiada wiele składowych o różnych częstotliwościach. Dlatego też tak wielkim przewrotem w dziedzinie łączności na falach podczerwonych i świetlnych było wynalezienie lasera, który daje silny strumień monochromatycznego światła koherentnego. Zasada pracy lasera zostanie opisana szczegółowo w rozdziale 7, natomiast tutaj należy bliżej wyjaśnić pojęcie promieniowania niekoherentnego i koherentnego.

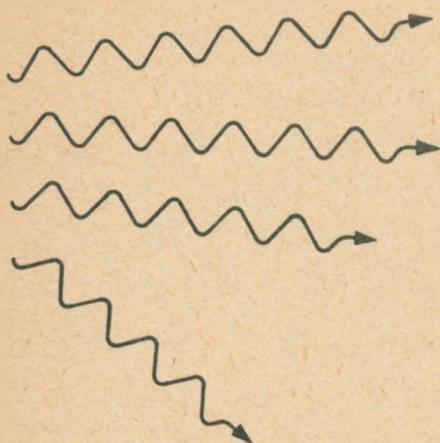
W ciałach o wysokich temperaturach, wysyłających promieniowanie cieplne i świetlne, każda cząsteczka i atom promieniuje niezależnie w różnych kierunkach, na różnych częstotliwościach, z przypadkową fazą i polaryzacją, jak to obrazowo przedstawia rys. 1. Oznacza to, że wytworzenie wiązki promieniowania zawierającej fale w wąskim zakresie częstotliwości jest prawie niemożliwe, jedynie na składowe w wybranym zakresie częstotliwości



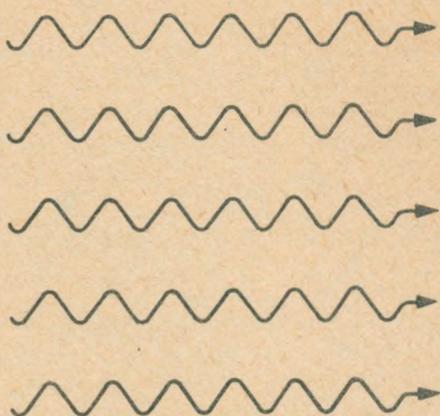
Rys. 1. Promieniowanie niekoherentne z naturalnych i sztucznych źródeł światła

może przypadać odpowiednio większa część ogólnej energii promieniowania niż na składowe o innych częstotliwościach. Krokiem naprzód jest wytworzenie światła monochromatycznego, które posiada wszystkie wady światła niekoherentnego z wyjątkiem tej, że wszystkie składowe promieniowania mają prawie tę samą częstotliwość /rys. 2/. Ze źródłami takimi również można się spotkać w naturze.

Jednak dopiero zastosowanie lasera pozwoliło na wytworzenie koherentnego strumienia świetlnego, którego wszystkie składowe mają ten sam kierunek promieniowania, tę samą częstotliwość, fazę i polaryzację /rys. 3/. Użytkiwana koherentność jest bardzo duża, np. na falach podczerwonych /w zakresie częstotliwości od około 100 THz do 400 THz/ cały zakres promieniowania fal niektórych rodzajów laserów mieści się w granicach 100 Hz, a dodając



Rys. 2. Promieniowanie monochromatyczne ze wszystkimi składowymi o jednakowej częstotliwości



Rys. 3. Promieniowanie koherentne z generatora laserowego

do tego jeszcze dużą intensywność strumienia świetlnego należy stwierdzić, że tego typu źródeł promieniowania w naturze dotychczas nie spotykało się.

Zasadniczą różnicą między promieniowaniem niekoherentnym a koherentnym z punktu widzenia wykorzystania do łączności jest to, że w przypadku promieniowania niekoherentnego można stosować wyłącznie modulację amplitudy, czyli inaczej mówiąc modulację intensywności promieniowania, co nie pozwala na transmisję dostatecznie szerokich pasm /przy uwzględnieniu zwłaszcza tak wielkiej częstotliwości fali nośnej/ i stwarza podatność linii łączności na wszelkie zakłócenia zewnętrzne. Natomiast promieniowanie koherentne może być, tak samo jak każda inna fala nośna stosowana w łączności mikrofalowej, mo-

dulowana w częstotliwości, co pozwala na transmisję na falach świetlnych niesłychanie szerokich pasm oraz uzyskanie zysku modulacji w odniesieniu stosunku sygnału do szumów.

Po tym wyjaśnieniu jest rzeczą oczywistą, że do czasu wynalezienia lasera przy łączności na falach podczerwonych można było stosować wyłącznie modulację amplitudy. Proponowanych i wypróbowanych sposobów modulacji jest bardzo dużo, nieomal tyle samo, ile różnych typów generatorów niekoherentnego promieniowania podczerwonego. Najczęściej modulacja intensywności promieniowania następuje przez zmianę w funkcji przebiegu modulującego temperatury ciała promieniującego. Tak więc na przykład eksperymentalne linie łączności, pracujące przy wykorzystaniu cezowych lub ksenonowych lamp wyładowczych o maksimum promieniowania na falach podczerwonych w pobliżu zakresu widzialnego $/0,8 - 0,9 \mu/$, stosowały modulację za pomocą zmiany natężenia prądu płynącego przez lampę.

Po stronie odbiorczej jako detektory fal podczerwonych stosuje się różnego typu bolometry oraz fotoelementy. Bolometr zawiera płytkę termistorową pokrytą cienką warstewką czerni. Energia promieniowania podczerwonego padającego na tę płytkę zamienia się w ciepło, które powoduje zmianę oporności płytki. Płytkę jest włączona do obwodu elektrycznego szeregowego z innym oporem i źródłem prądu stałego, tak że zmiany jej oporności powodują zmiany wartości prądu w obwodzie, które są następnie wzmacniane przez odpowiednie układy lampowe lub tranz-

zystorowe i doprowadzane do wskaźnika optycznego /ręlar/ lub akustycznego /łączość telefoniczna/.

Fotoelementy, których działanie jest oparte na wykorzystaniu zewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego, są to przyrządy próżniowe o czułej fotokatodzie w kształcie płaskiej płytki oraz anodzie w postaci np. pierścienia. Między katodę i anodę zostaje przyłożone stałe napięcie, na ogół rzędu kilkuset woltów. Po napromieniowaniu katody światłem zewnętrznym w obwodzie z włączonym w szereg oporem pojawi się prąd na skutek emisji elektronów przez substancję fotokatody pod wpływem napromieniowania, przy czym wartość tego prądu jest proporcjonalna do intensywności padającego promieniowania. Powielacze fotoelektronowe wykorzystują dodatkowe zjawisko wtórnej emisji elektronów z odpowiednich substancji pod wpływem energii padających na nie elektronów pierwotnych. Stosowane do celów łączości na falach podczerwonych fotokomórki są specjalnie uczulone na to promieniowanie. W tym celu używa się materiałów półprzewodnikowych, takich jak siarczki ołowiu, selenek ołowiu oraz ostatnio specjalnie spreparowany german.

Porównanie obu tych typów detektorów fal podczerwonych jest dosyć trudne. Bolometr działa jednakowo dobrze w szerokim zakresie częstotliwości fal odbieranych, jest jednak co najmniej 100 razy mniej czuły od fotokomórki, nie mówiąc już o fotopowielaczu. Fotokomórki odznaczają się stosunkowo dużą czułością i małą bezwładnością, natomiast poszczególne rodzaje są bardzo selektywne, mogą pracować tylko w wąskich pasmach częstotli-

wości. Z tych też względów fotokomórki są na ogół znacznie częściej wykorzystywane w urządzeniach odbiorczych łączności, natomiast bolometry są stosowane w systemach radarowych biernych, które mają za zadanie wykrywać obce obiekty na podstawie ich własnego promieniowania, a ponieważ temperatury tych obiektów są różne, przeto i częstotliwości promieniowanych przez nie fal zawierają się w dość szerokich granicach.

W ostatnim okresie, w związku ze wzrastającym zainteresowaniem łącznością na falach świetlnych i podczerwonych, są prowadzone intensywne prace w dziedzinie budowy odpowiednich układów, przede wszystkim modulatorów i detektorów. Prace idą między innymi w kierunku ulepszenia bolometrów, które są uczulone przez zastosowania właściwych materiałów termistorowych oraz wykonywane w postaci selektywnych układów przez umieszczenie ich w kapsułkach wykonanych z materiału przepuszczającego tylko pewne zakresy ogólnego widma fal podczerwonych. Ostatnio na przykład firma Bell opracowała fotokomórki kadmo-germanowe o stałej czasu poniżej 1 μ s, uczulone na fale podczerwone w zakresie od około 8,5 do 13,5 μ . Zakres ten jest szczególnie użyteczny do celów łączności z obiektami kosmicznymi ze względu na stosunkowo małe tłumienie fal tego zakresu przez atmosferę oraz dla radarów dalekiego zasięgu i utrzymywania łączności z łodziami podwodnymi.

W skład urządzeń łączności na falach podczerwonych poza generatorami, modulatorami i detektorami wchodzi przede wszystkim anteny kierunkowe, pozwalające na uży-

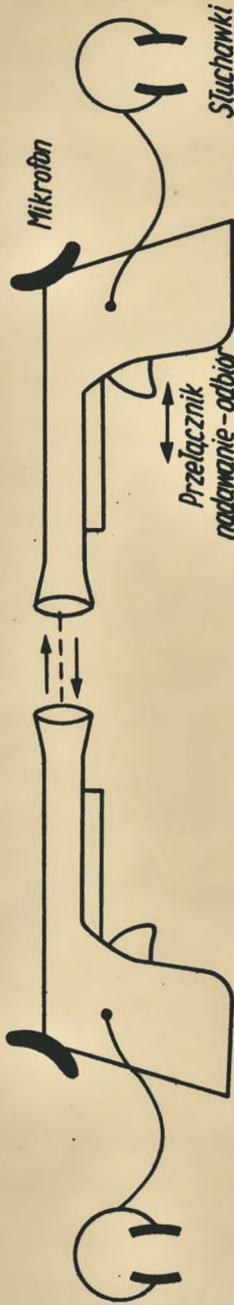
skanie wąskiej wiązki promieniowania. W przypadku na przykład anten ze zwierciadłem parabolicznym w ognisku reflektora anteny nadawczej zostaje umieszczone źródło promieniowania, a w ognisku anteny odbiorczej - detektor tego promieniowania. Podobnie jak w optyce świetlnej zdolność skupiania energii rośnie z kwadratem średnicy zwierciadła i odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu długości ogniskowej. Ze względu na małą długość fal podczerwonych stosuje się także soczewki skupiające, wykonane z przezroczystego dla promieni podczerwonych materiału. Ze znanych materiałów najbardziej przepuszczalny dla podczerwieni, bo aż w 90%, jest kwarc, ale niejednakowo w całym pasmie fal podczerwonych. W 70% jest przezroczysty szafir, a w 50% german. W celu wydzielenia pożądanego promieniowania z całego zakresu fal promieniowania podczerwonego, które jak przewidziano w rozdziale 3, na skutek promieniowania Ziemi i Słońca jest zawarte w całej atmosferze otaczającej Ziemię w stopniu większym w dzień a mniejszym w nocy, trzeba stosować specjalne filtry /selektywne, pochłaniające, polaryzujące itp./.

W oparciu o opisaną powyżej technikę zostały już zrealizowane pierwsze eksploatacyjne urządzenia nadawczo-odbiorcze przeznaczone dla transmisji rozmów. W Stanach Zjednoczonych wykonano już wiele tego typu urządzeń przeznaczonych do celów wojskowych, policyjnych, porozumiewania się załóg okrętów między sobą i władzami portowymi itp. Spośród nich na specjalną uwagę zasługują urządzenia w kształcie pistoletów /rys. 4/, umożliwiając-

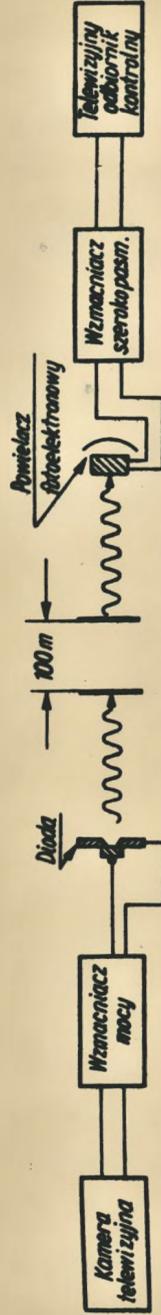
ce utrzymanie łączności między dwoma osobami na odległość około 5 km lub 30 km, w zależności od wariantu urządzenia, różniącego się głównie wielkością optycznego układu skupiającego wiązkę promieniowania. Podane zasięgi odnoszą się do godzin dziennych, w nocy zasięgi mogą być znacznie większe. Ten system łączności nosi nazwę Maxsecom /Maximum Security Communications/, zapewnia bowiem rzeczywiście całkowitą tajność rozmów i jest praktycznie wolny od wpływu wszelkich zewnętrznych zakłóceń.

Ciężar całego urządzenia, na który składa się układ optyczny, lampa promieniująca fale podczerwone, kryształ modulacyjny półprzewodnika germanu oraz detektor, wynosi niecałe 4 kg. Promieniowanie lampy jest skupiane przez układ soczewek i skierowane na kryształ, którego przepuszczalność jest zależna od przyłożonego na niego napięcia zmiennego. W ten sposób następuje modulacja intensywności strumienia świetlnego wychodzącego przez kolejny układ skupiający na zewnątrz urządzenia. Kierunkowość promieniowania jest przy tym tak duża, że największe trudności następują przy nawiązaniu łączności. Po stronie odbiorczej /taki sam "pistolet"/ odbierane promieniowanie jest skupiane przez soczewkę, w ognisku której jest umieszczony detektor.

Mimo postępów w budowie generatorów światła koherentnego, tj. laserów, nie ustają jednak dalej próby nad łącznością na falach podczerwonych przy wykorzystaniu znacznie technicznie prostszych układów wytwarzania niekoherentnego strumienia fal podczerwonych. Jako uwieńczony najlepszymi wynikami należy tu opisać eksperyment



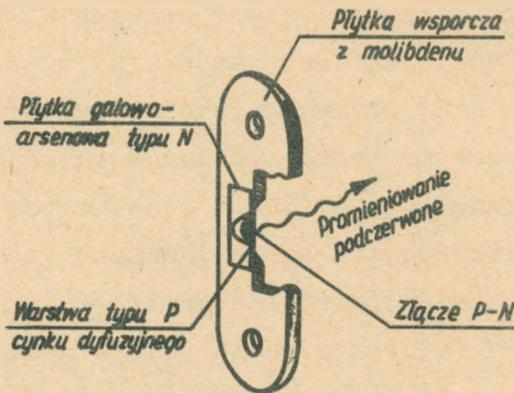
Rys.4. Łączność na falach podczerwonych za pomocą urządzeń nadawczo-odbiorczych w kształcie pistoletów



Rys.5. Przesyłanie sygnałów telewizyjnych na falach podczerwonych
Przemienianie niekoherentne z diody galowo-arsenowej GaAs

przeprowadzony w połowie 1962 r. w Massachusetts Institute of Technology. W warunkach laboratoryjnych przesłano tu za pomocą niekoherentnego strumienia fal podczerwonych na odległość około 100 metrów sygnał telewizyjny, przy czym obraz był tak samo dobry jak przy bezpośrednim połączeniu przewodowym kamery z odbiornikiem kontrolnym /rys. 5/.

Jako źródło promieniowania fal podczerwonych zastosowano specjalnie wykonaną diodę galowo-arsenową /rys.6/. Przy pracy w temperaturze 77°K przekształcała ona z wydajnością 85% zasilający prąd stały w energię promieniowania podczerwonego w stosunkowo wąskim pasmie w pobli-



Rys. 6. Dioda GaAs wytwarzająca pod wpływem prądu stałego promieniowanie na falach podczerwonych

żu fali o długości $0,85 \mu$. Z elementu czynnego diody o powierzchni 10^{-3} cm^2 uzyskano moc promieniowania ponad 1 W, co odpowiada 1 kW/cm^2 . Modulację intensywności promieni podczerwonych w granicach powyżej 4 MHz uzyskiwano przez zmianę w takt napięcia sygnału prądu zasilają-

cego diodę. Promienie podczerwone były skupiane przez soczewkę dającą zysk optyczny około 1000 i skierowane po stronie odbiorczej na płytkę powielacza fotoelektrowego typu 7102, specjalnie uczuloną na promieniowanie w zakresie $0,85 \mu$. Lampa fotopowielacza była umieszczona w ognisku reflektora o średnicy około 35 cm.

Ze względu na brak odpowiedniego filtra próby mogły być prowadzone jedynie wieczorem lub w nocy. Przy zastosowaniu takiego filtra można by utrzymywać łączność przy pełnym świetle dziennym.

Ponieważ długość fali podczerwonej odpowiadała zakresowi fal mało tłumionemu przez atmosferę, pomiary wykazały, że przy wykorzystaniu bardzo podobnych urządzeń można by utrzymywać łączność przy transmisji sygnałów telewizyjnych na odległości co najmniej 50 km. Obecnie przygotowuje się odpowiedni sprzęt do przeprowadzenia takich prób.

Należy podkreślić, że mimo niekoherentnego źródła promieniowania /jednak całe promieniowane widmo zawierało się w granicach tylko 100 \AA^0 / można było uzyskać pasmo modulacji 100 MHz, /choć wykorzystywano tylko 4 MHz/, czyli pasmo pozwalające na przesyłanie około 20 sygnałów kanałów telewizyjnych lub 20000 sygnałów telefonicznych. Jeżeli dalsze próby doprowadzą do ulepszenia układu generacyjnego z punktu widzenia koherentności i intensywności promieniowania, to dla zakresu fal podczerwonych może on się stać, ze względu na dużo większą prostotę i małe koszty produkcji, groźnym konkurentem generatorów promieniowania koherentnego - laserów.

Ogólnie można powiedzieć, że obecnie konstruktor urządzeń pracujących na falach podczerwonych znajduje się w sytuacji swego starszego kolegi sprzed 20 lat, konstruującego urządzenia mikrofalowe. Nie posiada on również żadnych elementów ani podzespołów, którymi mógłby dowolnie rozporządzać. Wiele trzeba jeszcze przeprowadzić badań naukowych i praktycznych, aby móc stwierdzić, że łączność na falach podczerwonych została opanowana. Tym niemniej postęp w tej dziedzinie chociaż niezbyt szybki jest stały i konsekwentny, tak że niewątpliwie w ciągu najbliższych 10 - 20 lat i ten sposób łączności tak się rozwinię, że będzie pełnoprawnym współpartnerem innych, bardziej konwencjonalnych, systemów łączności radiowej. Prace nad rozwojem łączności w tym zakresie częstotliwości są między innymi inspirowane przez potrzeby łączności na bardzo duże odległości z obiektami w przestrzeni kosmicznej, a już sam przewidywany postęp w dziedzinie podboju przestrzeni kosmicznej jest wystarczającą rękojmią, że łączności na falach podczerwonych nie grozi zastój ze względu na brak zainteresowanych użytkowników.

6. ŁĄCZNOŚĆ NA FALACH SWIERTELNYCH

W czasie pierwszych prób łączności na falach podczerwonych zasięg był bardzo ograniczony przez małe natężenie strumienia dostępnych źródeł niekoherentnego promieniowania, którymi były ciała czarne o temperaturach ograniczonych do kilku tysięcy stopni Kelwina. Ponadto na skutek konieczności stosowania modulacji amplitudy nie

można było uzyskać ani zbyt dużej szerokości transmitowanego pasma, ani dostatecznie wysokiego stosunku sygnału do szumów. Dopiero wynalezienie sposobów generacji koherentnego światła, które ze względu na modulację zachowuje się tak samo jak fale radiowe, pozwoliło na przenoszenie informacji poprzez modulację częstotliwości fali nośnej. Przez wykorzystanie koherentnego promieniowania świetlnego liczba linii łączności, pracujących w tym zakresie częstotliwości, będzie mogła przewyższać około dziesięć tysięcy razy liczbę linii pracujących przy uwzględnieniu tylko zakresu fal radiowych. Ponadto własności odbijania się tych fal od obiektów pozwalają na wykorzystanie ich w układach radarowych czynnych, podobnych do tych, które pracują na falach radiowych. Ponieważ otrzymane światło jest monochromatyczne, dla zabezpieczenia się przed szkodliwym wpływem promieniowania świetlnego słońca i gwiazd, wystarczy zastosowanie odpowiednich filtrów i łączność może się odbywać bez przeszkód w pełnym świetle dziennym.

Dalszą zaletą światła koherentnego otrzymywanego przy wykorzystaniu laserów jest to, że wytwarzana wiązka światła o dużej kierunkowości posiada bardzo dużą gęstość energii, niespotykaną w naturze. Wystarczy powiedzieć, że obecne laboratoryjne układy laserów pozwalają na uzyskanie gęstości mocy promieniowania przeszło milion razy większej od występującej na powierzchni Słońca. Tak duże kierunkowości i intensywności promieniowania pozwalają na osiągnięcie w granicach widzialności optycznej bardzo dużych zasięgów przy stosunkowo małych mocach

źródeł energii. Kierunkowość tę może obrazować ostatnio przeprowadzone doświadczenie w laboratorium Lincolna. Przy skierowaniu wiązki promieniowania świetlnego z lasera na powierzchnię Księżyca wiązka ta oświetliła według obliczeń powierzchnię Księżyca tylko w kole o średnicy około 3 km. W przypadku mikrofal podobny obszar miałby średnicę około 40.000 km.

Ponieważ tak wiele zalet posiada i tak wiele perspektyw stwarza koherentne promieniowanie na częstotliwościach odpowiadających falom podczerwonym, falom świetlnym widzialnym, a w przyszłości zapewne i falom nadfioletowym, należy zapoznać się z zasadami pracy oraz rozwiązaniami praktycznymi układów ich wytwarzania - laserami. Należą one do rodziny wzmacniaczy molekularnych - maserów, technika budowy których rozwinęła się stosunkowo niedawno, ściśle mówiąc od około 1954 roku, w którym to wykonano po raz pierwszy w warunkach laboratoryjnych wzmacniacz mikrofalowy przy zastosowaniu jako materiału czynnego amoniaku w stanie gazowym. Pierwszy laser, czyli molekularny wzmacniacz i generator fal świetlnych, został zbudowany w latach 1958-1960 na materiale czynnym w postaci kryształu rubinu.

Zasadnicza różnica w zasadzie działania wzmacniaczy molekularnych w stosunku do wzmacniaczy lampowych polega na tym, że w tym ostatnim przypadku zamiast wykorzystywania zjawiska oddziaływania fali elektromagnetycznej na ruch wolnych elektronów, wykorzystuje się działanie tej fali na elektrony, które pozostają cały czas związa-

ne w obrębie atomu lub cząsteczki. Proces wzmacniania odbywa się przy wykorzystaniu stanów energetycznych i sił wewnątrz atomowych.

7. LASERY JAKO PODSTAWOWE URZĄDZENIA DO WZMACNIANIA I GENERACJI KOHERENTNEGO PROMIENIOWANIA ŚWIETLNEGO

7.1. Zjawiska światła atomu wykorzystane przy budowie wzmacniacza molekularnego

Nazwa "maser" pochodzi od pierwszych liter zdania określającego zasadę działania wzmacniacza molekularnego - "Microvave Amplification by Stimulated Emission of Radiation", to znaczy - wzmacnianie sygnałów mikrofalowych przez wymuszoną energię promieniowania. Wykorzystuje się przy tym zjawisko kwantowego pochłaniania i promieniowania fal elektromagnetycznych przez atomy /jak również cząsteczki i całe kryształy/. Atomy mogą mianowicie znajdować się tylko w określonych stanach energetycznych, jest niemożliwe nawet chwilowe przyjmowanie stanów pośrednich, tylko nagły przeskok z jednego stanu na drugi z pobraniem lub oddaniem kwantu energii. Tak na przykład przejście z niższego poziomu energetycznego na wyższy jest związane z pochłanianiem energii fali elektromagnetycznej. Wielkość energii potrzebnej do tego celu zależy od różnicy poziomów energetycznych - im większa ta różnica, tym energia kwantu musi być większa. Ponieważ energia kwantu jest tym większa, im większa jest częstotliwość fali zgodnie z równaniem:

$$f = \frac{\Delta E}{h}$$

gdzie:

E - różnica energii stanów energetycznych

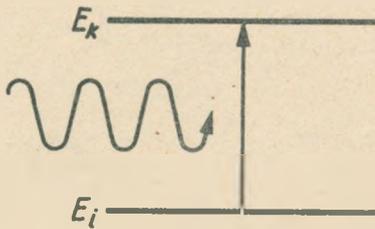
h - stała Plancka

stąd prosty wniosek, że zmiana stanu energetycznego atomu może nastąpić tylko przez pochłanianie i promieniowanie fal elektromagnetycznych o ściśle określonych częstotliwościach. Przez dobór odpowiednich materiałów można osiągnąć to, że częstotliwości te będą odpowiadały falom radiowym zakresu mikrofalowego lub falom świetlnym.

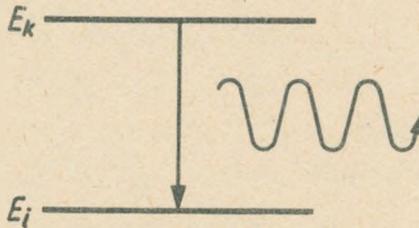
Zjawiska powyższe są związane z budową atomu, którego uproszczony model można, jak wiadomo, wyobrazić sobie w postaci jądra i krążących wokół niego po różnych orbitach i w różnej liczbie /zależnej od rodzaju pierwiastka/ elektronów. Każdemu torowi elektronu w atomie odpowiada określony poziom energetyczny, który jest tym wyższy, im dalej w stosunku do jądra tor ten jest położony. Elektron nie może krążyć po orbicie pośredniej, a tylko może nastąpić przeskok z orbity bliższej na dalszą /pochłanianie energii zewnętrznej/ lub dalszej na bliższą /oddawanie energii w postaci promieniowania/. Ilości pochłanianej lub oddawanej w trakcie tego energii /częstotliwość fal elektromagnetycznych/ zależą przy tym i od tego, między którymi orbitami następuje przeskok elektronu.

W warunkach normalnych atomy większości pierwiastków znajdują się w najniższym możliwym, tzw. podstawowym sta-

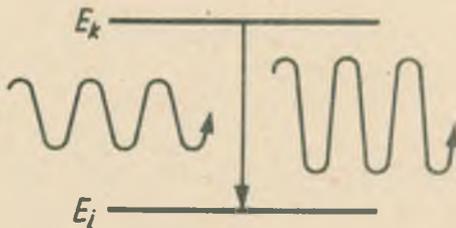
nie energetycznym. Chcąc wzbudzić atom do wyższego poziomu energetycznego, jak mówimy "napompować", trzeba poddać go działaniu fali elektromagnetycznej o odpowiedniej częstotliwości /rys. 7a/.



a) Absorpcja padającej fali



b) Emisja spontaniczna



c) Emisja wymuszona

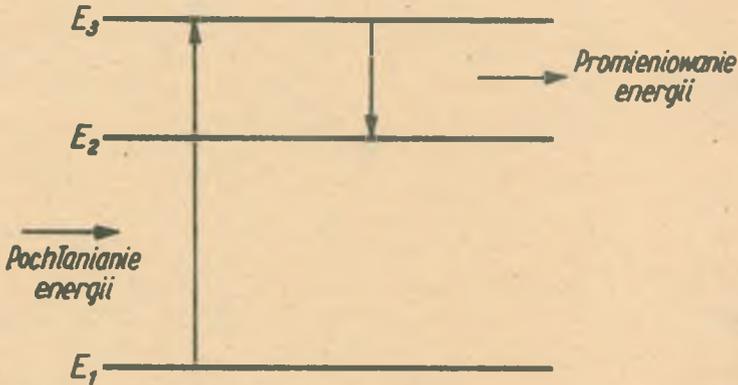
Rys. 7. Zjawiska zachodzące w materiale aktywnym masera o dwóch poziomach energetycznych $E_k > E_i$

Podwyższony stan energetyczny atomów nie jest stanem normalnym, przeto pozostawienie takiego "napompowanego" materiału bez dalszej ingerencji zewnętrznej spowoduje, że na skutek ruchów cieplnych będzie następowało przypadkowe, spontaniczne przeskakiwanie elektronów na poziom energetyczny niższy, co objawi się bezładnym promieniowaniem mającym charakter szumów /rys. 7b/. Ponieważ jest to przy wzmacnianiu zjawisko jak najbardziej niepożądane, zmniejsza się ruchy cieplne w materiale, umieszczając go w niskiej temperaturze, np. ciekłym helu /4°K/. W tych warunkach promieniowania spontanicznego prawie nie ma, a kontrolowane promieniowanie wymuszone może nastąpić tylko pod wpływem pobudzenia napompowanego energetycznie materiału przez sygnał o określonej częstotliwości /rys. 7c/. Promieniowanie wymuszone ma przy tym częstotliwość odpowiadającą sygnałowi pobudzającemu, czyli w ten sposób następuje wzmocnienie energii wielkiej częstotliwości sygnału. Ponieważ maser pracuje w niskiej temperaturze, przeto szumy jego są niewielkie i może on się odznaczać dużą, nieosiągalną w innych układach czułością.

7.2. Warunki pracy użytkowego układu masera

Największe zainteresowanie wzbudził już dotychczas maser pracujący na kryształach rubinu /atomy tlenku glinu z domieszką atomów chromu/. Atomy tego materiału mogą znajdować się w jednym z trzech poziomów energetycznych /rys. 8/. Doprowadzając do masera z niezależnego źródła

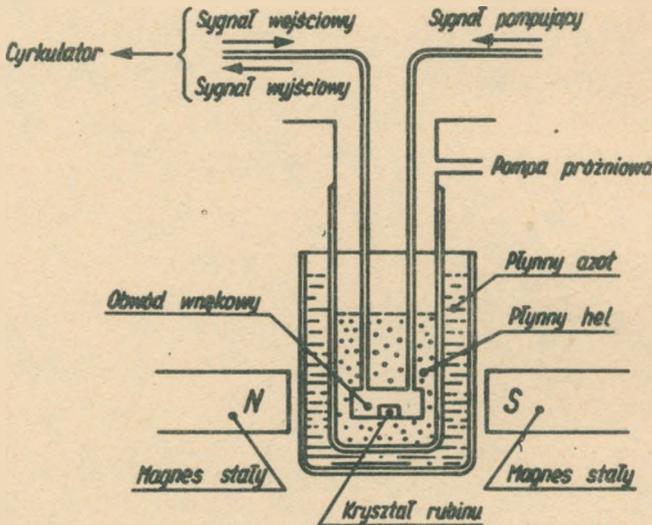
w sposób ciągły energię o określonej częstotliwości f_1 powodujemy przesunięcie większości atomów na najwyższy poziom energetyczny $/E_1 \rightarrow E_3/$. Przez obniżenie tempera-



Rys. 8. Zjawiska zachodzące w materiale aktywnym masera o trzech poziomach energetycznych

tury otoczenia zapobiega się emisji spontanicznej, tak że może nastąpić tylko emisja wymuszona o częstotliwości f_2 , w trakcie której atomy przechodzą na pośredni poziom energetyczny $/E_3 \rightarrow E_2/$. Ponieważ różnica poziomów energetycznych w trakcie pochłaniania i oddawania energii przez atomy nie jest jednakowa, wynika stąd, że częstotliwość fali "pompującej" f_1 nie jest równa częstotliwości fali wzmacnionej f_2 , lecz musi być od niej większa. Jedną z zalet rubinu jest to, że odstęp między powyższymi trzema poziomami energetycznymi daje się w pewnych granicach regulować przez zmianę natężenia zewnętrznego pola magnetycznego wytworzonego przez magnes stały, czyli w ten sposób można "dostroić się" do pożądanego częstotliwości sygnału wzmacnianego.

Budowę tego typu masera ilustruje rys. 9. Maser jest umieszczony w pudełku metalowym, tzw. rezonatorze wewnętrznym, który jest dostrojony zarówno do częstotliwości sygnału pompującego f_1 , jak i sygnału wzmacnianego f_2 .



Rys. 9. Konstrukcja masera z kryształem rubinu Al_2O_3

Sygnały pobudzający i wzmacniany są przesyłane tym samym falowodem, a do rozdzielania sygnałów obu kierunków służy urządzenie zwane cyrkulatorem. Przeznaczenie pozostałych elementów układu jest oczywiste na podstawie podanych powyżej zasad pracy masera.

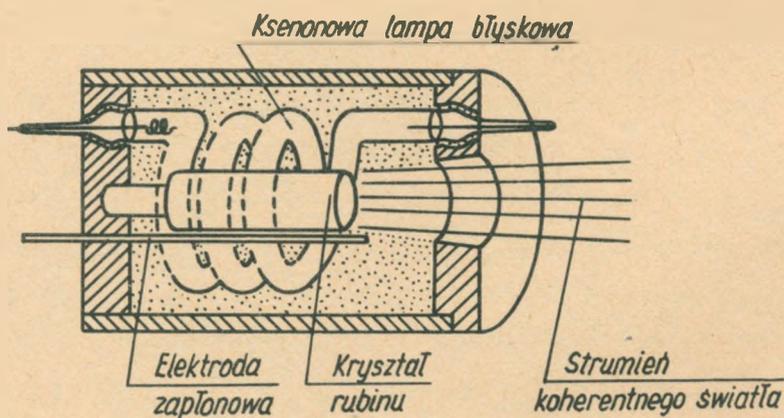
7.3. Wzmacniacz fal świetlnych - laser

Dalszym krokiem naprzód było przystosowanie wzmacniaczy molekularnych do wzmacniania sygnałów o częstotliwościach odpowiadających falam świetlnym. W ten sposób po-

wstał laser. Pierwszą literę m /m-aser/ zastąpiono literą l /l-aser/ ponieważ w tym przypadku ma miejsce wzmacnianie fal świetlnych /light/, a nie mikrofal /microwave/. Zasada pracy lasera jest taka sama, jak zasada pracy masera krystalicznego, jedyna różnica polega na zmianie zakresu wzmacnianych częstotliwości. Do pompowania materiału aktywnego lasera służą fale świetlne otrzymywane na przykład z odpowiedniego typu lampy. Wykorzystuje się tu także znane własności fluorescencyjne niektórych materiałów polegające na tym, że przy naświetleniu ich promieniami świetlnymi zaczynają z kolei one same promieniować fale świetlne, przy czym częstotliwość fali tego wtórnego promieniowania jest mniejsza. Na przykład kryształ rubinu poddany naświetleniu składowymi zielonymi światła białego wysyła składowe czerwone. Promieniowanie zielone przesuwają mianowicie atomy chromu w siatce krystalicznej rubinu z poziomu energetycznego pośredniego na najwyższy. Przy spontanicznym powrocie z tego ostatniego na pośredni nie następuje emisja światła, natomiast dalszemu przechodzeniu z poziomu pośredniego na podstawowy towarzyszy promieniowanie czerwone. Częstotliwość światła zielonego jest większa niż czerwonego, ponieważ różnica energii przy przeskoku powrotnym jest mniejsza niż przy przeskoku pierwotnym.

Na wyjściu lasera otrzymuje się intensywne, koherentne promieniowanie światła czerwonego, trwające tak długo, jak długo ma miejsce naświetlanie kryształu światłem zielonym. Światło to ma tę samą długość fali, jak

w przypadku samoczynnego, fluorescencyjnego promieniowania kryształu rubinu, ale jest 60 razy bardziej monochromatyczne, tzn. promieniowane fale mieszczą się w 60 razy węższym zakresie długości fal. Ze względu na dużą moc, która jest niezbędna do pobudzenia atomów chromu, nie udawało się przez długi czas zapewnić ciągłej pracy tego typu lasera. Wykorzystywano tylko jego pracę impulsową w takt pobudzania błyskami lampy naświetlającej /rys. 10/. Mimo powyższej wady laser taki zastosowano już przy opracowywaniu układu radarowego pracującego przy wykorzystaniu fal świetlnych /patrz rozdział 9/.

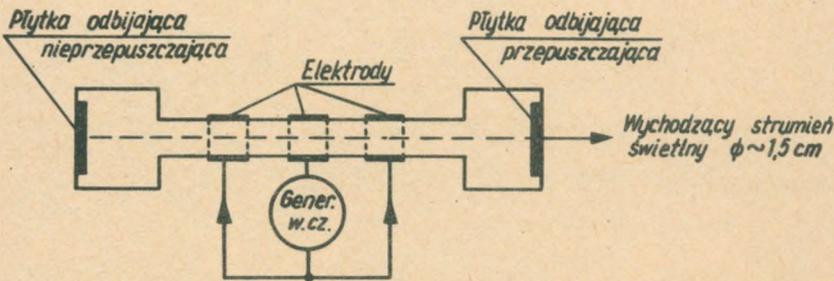


Rys. 10. Laser ze spiralną lampą błyskową

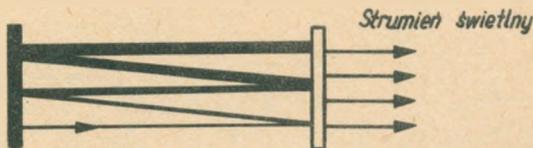
Następne próby pozwoliły na opracowanie układu lasera wzmacniającego i generującego falę ciągłą. Jest to laser typu gazowego, pracujący na mieszaninie neonu i helu, przez którą płynie elektryczny prąd wyładowania o znacznie mniejszej mocy od mocy lampy błyskowej, który pobudza najpierw energetycznie atomy helu. Przez zderze-

nie atomów helu z atomami neonu następuje przekazanie energii tym ostatnim, które powracając do podstawowego poziomu energetycznego wysyłają falę świetlną o częstotliwości różnej od częstotliwości fali pobudzającej.

Zasadę pracy tego typu lasera przedstawia rys. 11a. W trakcie wytwarzania koherentnego promieniowania ma takie miejsce jego wzmocnienie dzięki wielokrotnym odbiciom między powierzchniami odbijającymi na końcach lampy /rys. 11b/. Jedna z płytek odbijających częściowo prze-



a) Układ elektryczny lasera



b) Zasada wewnętrznego wzmocnienia energii w laserze

Rys. 11. Zasada pracy lasera helowo - neonowego

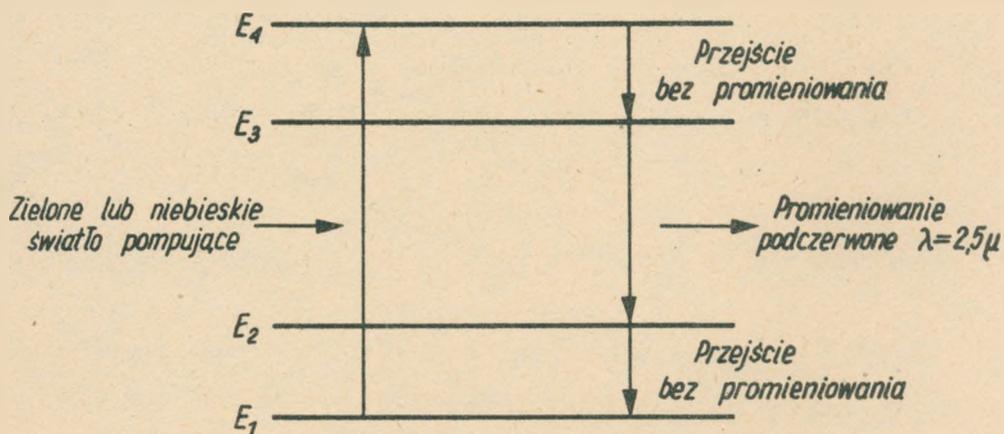
puszcza promieniowanie /odbicie tylko 90%/, tak że poprzez nią następuje za każdym odbiciem przejście części strumienia na zewnątrz i przez dodanie się wszystkich

wychodzących strumieni zostaje wytworzony intensywny strumień promieniowania o średnicy około 1,5 cm. Należy przy tym zwrócić uwagę, że promienie odchylone w stosunku do osi wychodzą na zewnątrz nie wzmocnione, natomiast wzmocnieniu ulega tylko strumień promieniowania wzdłuż osi. Dzięki temu na wyjściu otrzymuje się koherentność promieniowania zarówno co do miejsca /w każdym momencie czasowym wszystkie składowe promieniowania w płaszczyźnie prostopadłej do osi mają te same fazy/, jak i co do czasu /częstotliwości poszczególnych składowych mieszczą się w niezwykle małych granicach, około 100 Hz/. Szerokość wiązki promieniowania 1', moc wyjściowa 15 miliwatów, a moc pobudzenia mniejsza od 0,5 wata /dużo mniej niż przy rubinie/. Ponieważ atomy neonu mogą odpromieniowywać swoją energię z każdego z czterech wyższych poziomów energetycznych, można uzyskać promieniowanie lasera aż na 30 niezależnych częstotliwościach w zakresie od $9.000 \text{ \AA}^{\circ}$ do $17.000 \text{ \AA}^{\circ}$. Przez zastosowanie innych gazów należy spodziewać się powiększenia tej liczby.

7.4. Najnowsze osiągnięcie w technice budowy laserów

Zasadniczą wadą opisanego lasera z materiałem aktywnym stałym w postaci rubinu jest niemożliwość wytworzenia promieniowania ciągłego na skutek wymagania bardzo dużej energii źródła naświetlającego. Prace rozwojowe poszły przeto głównie w kierunku dobrania takiego materiału aktywnego, przy którym można by uzyskać więk-

szą sprawność lasera i promieniowanie ciągłe. Jako rezultat tych poszukiwań można wymienić doświadczenie z zastosowaniem kryształu fluorku potasu z jonami uranu /usunięte 3 elektrony z zewnętrznej powłoki atomu/, przy którym uzyskano ciągłą falę podczerwoną o długości 2,5 μ oraz z jonami samarium /2 elektrony z atomu usunięte/pozwalającym na promieniowanie w sposób ciągły fali świetlnej widzialnej o długości 7080 Å , przy czym do pobudzenia materiału aktywnego stosuje się lampę ksenonową, dającą tylko 0,002 mocy pompującej potrzebnej w przypadku materiału aktywnego w postaci rubinu. Taką oszczędność mocy uzyskuje się dzięki wykorzystaniu czterech poziomów energetycznych cząsteczek tych kryształów /rys. 12/. Przez odpowiednie chłodzenie kryształu obniża się na



Rys. 12. Zjawiska zachodzące w materiale aktywnym lasera o czterech poziomach energetycznych

wstępie liczbę elektronów w stanie 2. Następnie przez pompowanie kryształu światłem zielonym lub niebieskim przesuwa się jony uranu lub samarium na poziom 1, z któ-

rego przeskakują samorzutnie bez wytworzenia promieniowania na poziom 3. Promieniowanie powstaje dopiero przy przejściu z poziomu 3 na poziom 2, przy czym odpowiada ono falom o długości 2,5 u /w przypadku domieszek jonów uranu/. Na uwagę zasługuje przy tym fakt, że ciągłe promieniowanie uzyskano nie tylko w temperaturze ciekłego azotu, ale również i w temperaturach pokojowych .

W zastosowaniu do radarów firma General Electric opracowała laser pracujący na materiale czynnym rubinie, który pozwala na osiągnięcie mocy w impulsie około 1 kW, przy czym impulsy o szerokości około 1 us powtarzają się w odstępie kilku us lub też 10 razy na sekundę pojawia się impuls o szerokości 200 us. Ostatnie, niesprawdzone jeszcze informacje w amerykańskich czasopiśmie fachowych podają, że udało się zbudować laser na materiale krystalicznym, dający w impulsie moce ponad 10 kW. Uczelni przewidują, że przez zastosowanie jego sygnału pompującego energii powstającej przy wyładowaniach w plazmie będzie możliwe osiągnięcie z lasera krystalicznego mocy wyjściowej w impulsie rzędu 1 MW, co pozwoli na wykorzystanie go do penetracji odległych obszarów kosmicznych.

Obecnie są przeprowadzane również prace w celu wykorzystania jako źródła pompującego lasera wprost energii promieniowania Słońca, co ma bardzo duże znaczenie przy urządzeniach pokładowych pojazdów kosmicznych.

8. ZAGADNIENIE MODULACJI I DETEKCJI KOHERENTNEGO STRUMIENIA ŚWIETLNEGO

W obecnej fazie prac jest rzeczą trudniejszą modulowanie i detekowanie koherentnego strumienia świetlnego niż jego wytwarzanie, ale mimo to i w tej dziedzinie osiągnięto wiele pozytywnych rezultatów. Według najnowszych danych z literatury jest już możliwe w przypadku fali ciągłej modulować strumień świetlny w pasmie 1000 MHz oraz przy pracy impulsowej w pasmie 15.000 MHz, a uczeni obiecują powiększyć tę szerokość 10-krotnie w ciągu najbliższych kilku lat. Najbardziej interesująca jest przy tym modulacja częstotliwości, na której wykorzystanie pozwala koherentność promieniowania.

Do celów modulacji wykorzystuje się tak wiele zjawisk, że trudno nawet pobieżnie wszystkie je na tym miejscu omówić. Zasadniczo modulację amplitudy uzyskuje się przez zmianę w takt sygnału mocy pompującej lasera, np, mocy potrzebnej na powstanie wyładowań w laserze gazowym. Jedną z metod jest oddziaływanie zewnętrznym polem magnetycznym na materiał w ten sposób, że następuje rozszczepienie poziomów energetycznych. Przy wykorzystaniu tego zjawiska przez zmianę w takt sygnału natężenia pola otrzymuje się modulację częstotliwości wytwarzanego przez laser promieniowania. Można również wykorzystać w tym celu zmienne własności przepuszczania strumienia świetlnego lub skręcanie płaszczyzny polaryzacji przez kryształ, na który oddziaływuje się sygnałem modulującym. Otrzymuje się wówczas na wyjściu strumień spolaryzowane-

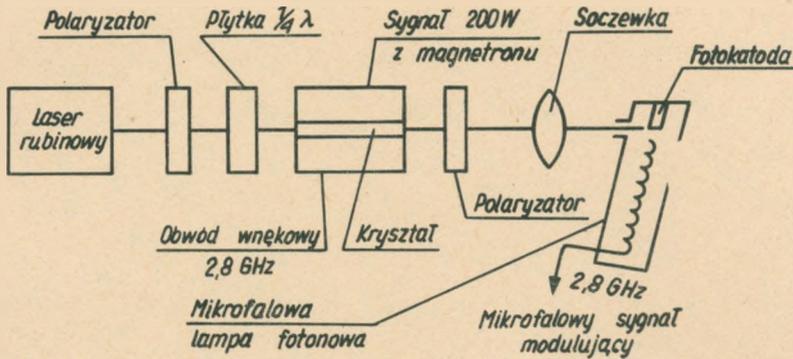
go, zmodulowanego światła, ale na skutek ograniczonych własności kryształu zakres modulacji jest nie większy od 50 - 100 MHz.

Jako detektory zmodulowanego strumienia świetlnego wykorzystuje się głównie uczulone na odpowiednie zakresy częstotliwości powielacze fotoelektronowe. Ze względu na bezwładność nie posiadają one jednak pasma przepuszczania szerszego od około kilkuset megaherców. Dlatego też w przyszłych systemach łączności szerokopasmowej będą stosowane innego typu detektory. Prace idą w kierunku wykonania odpowiednich detektorów wykorzystujących zjawisko foto-emisji, detektorów w postaci czułych na światło diod półprzewodnikowych, tranzystorów itp.

Jak wielokrotnie podkreślano, zasadniczą zaletą fal świetlnych jest możliwość transmisji bardzo szerokich pasm. Ażeby umożliwić przesyłanie wielu różnych sygnałów, strumień świetlny musi pozwolić modulować się niezależnymi sygnałami mikrofalowymi, które z kolei same będą modulowane sygnałami przesyłanych informacji. Z tego punktu widzenia są też opracowywane w laboratoriach naukowych metody modulacji i detekcji. Obecnie zostanie opisanych kilka doświadczalnych układów modulacji i demodulacji koherentnego strumienia świetlnego.

Układ modulacji zastosowany w doświadczalnym urządzeniu wykonanym przez Uniwersytet w Stanford pracuje w oparciu o wykorzystanie oddziaływania na strumień promieniowania przez kryształ zmieniający swe właściwości pod wpływem zewnętrznego pola /rys. 13/. Strumień świetlny

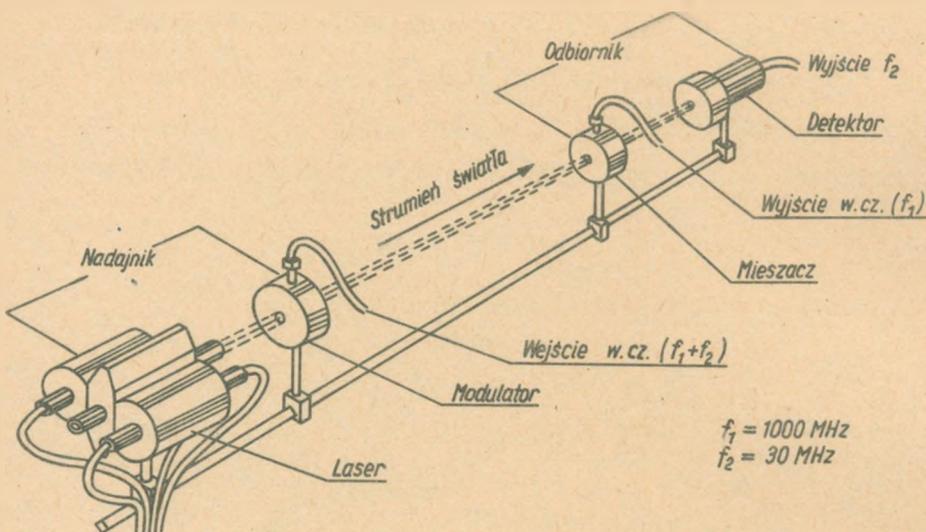
przechodzi tu przez kryształ z odpowiedniego materiału, umieszczony w osi jednego z wielu typów obwodów wnikowych, w którym jest wytwarzana fala stojąca sygnału modulującego. W podanym układzie doświadczalnym uzyskano 100% modulację amplitudy sygnałem mikrofalowym 2,8 GHz,



Rys. 13. Modulacja i demodulacja strumienia świetlnego sygnałem mikrofalowym 2,8 GHz

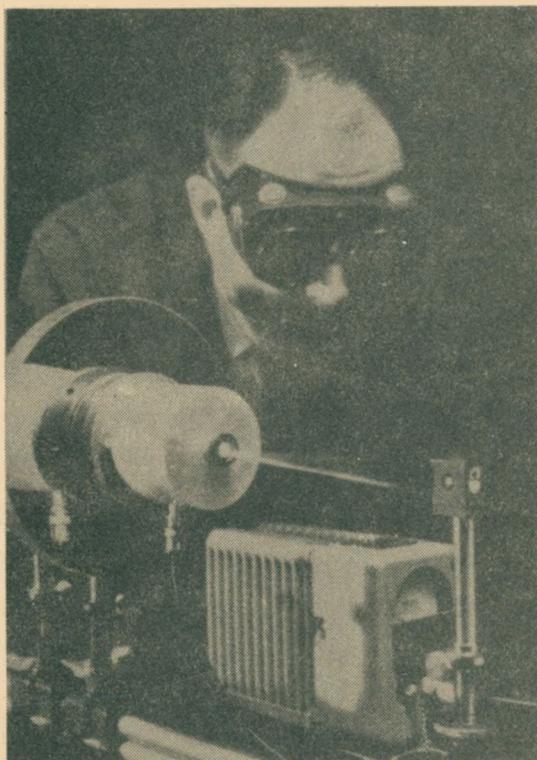
który z kolei był modulowany częstotliwościowo w pasmie 5 MHz. Twórcy układu przewidują, że uda się udoskonalić go tak, że będzie można strumień świetlny modulować sygnałem mikrofalowym kilka GHz i przy mocy nie większej od 100 W. Jako detektor zastosowano opisaną dalej mikrofalową lampę fotonową o pasmie przenoszenia od 1,5 do 4,5 GHz.

Podobną metodę modulacji i detekcji reprezentuje układ, którego zasadę działania przedstawia rys.14, a widok zewnętrzny rys. 15. Na rysunku są nie pokazane dwa filtry polaryzacji poziomej, które są umieszczone w układzie po obu stronach modulatora. Modulator ma postać



Rys. 14. Modulacja strumienia koherentnego promieniowania za pomocą sygnału mikrofalowego f_1 , modulowanego z kolei sygnałem użytkowym f_2

obwodu wewnętrznego, w którym jest umieszczony kryształ, przy czym jego oś optyczna jest skierowana w kierunku pola elektrycznego. Laser wytwarza ciągły strumień świetlny, który pada na kryształ. Natężenie strumienia wychodzącego z kryształu jest zależne od wielkości mocy sygnału modulującego wielkiej częstotliwości, doprowadzanego do obwodu z kryształem, gdyż od wielkości tego sygnału zależy skreślenie kąta polaryzacji w kryształach. Ponieważ na wyjściu modulatora jest umieszczony filtr polaryzacji poziomej, przy zmianie kąta rotacji o 90° natężenie strumienia zmienia się od maksimum do zera. W opisywanym przypadku strumień świetlny był modulowany sygnałem mikrofalowym 1000 MHz, modulowanym z kolei sygnałem użytkowym o częstotliwości 30 MHz.



Rys. 15. Widok zewnętrzny modulatora świetlnego, zasadę działania którego wyjaśnia rys. 14

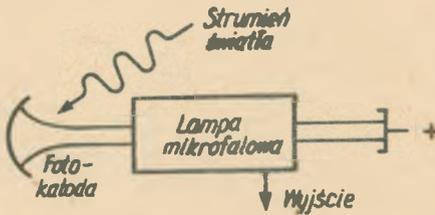
Po stronie odbiorczej strumień światła przechodził najpierw przez podobny do modulatora układ mieszacza, do którego z zewnątrz był doprowadzony sygnał o częstotliwości 1000 MHz. W rezultacie otrzymywano od razu częstotliwość różnicową 30 MHz, która mogła być już detekowana przez zwykłą fotokomórkę. Tak więc metoda ta pozwala na detekcję sygnału mikrofalowego za pomocą konwencjonal-

nego układu fotodetektora. Próby wykazały, że dodanie trzeciego filtra polaryzacyjnego o osi prostopadłej do strumienia świetlnego spolaryzowanego pionowo daje większą selektywność odbioru i poprawia stosunek sygnału do szumów.

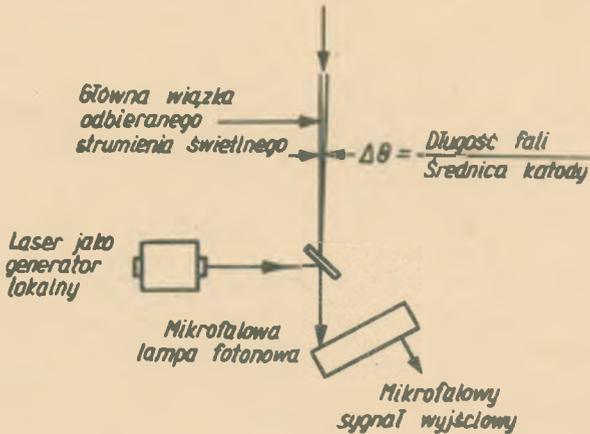
Przy zastosowaniu innego niż w powyższych doświadczeniach rodzaju kryształów można było zwiększyć częstotliwość sygnału modulującego do 15 GHz, ale głębokość modulacji przy pracy strumieniem ciągłym zmniejszyła się do 30%. Ograniczenie to wynikało z nadmiernego nagrzewania się kryształu, tak że 100% modulację można było wykorzystać tylko przy pracy impulsowej lasera.

Jako detektory promieniowania świetlnego modulowanego sygnałami mikrofalowymi mają zastosowanie powielacze foto-elektronowe, półprzewodnikowe detektory oraz mikrofalowe lampy fotonowe. Powielacze foto-elektronowe mają zbyt wiele wad, z których najważniejszymi są dość wąskie pasmo przepuszczania oraz niemożność detekcji strumienia świetlnego modulowanego częstotliwościami, aby mogły być stosowane poza wyjątkowymi przypadkami, gdy wymagana jest duża czułość kosztem mniejszej szerokości pasma i strumień świetlny jest modulowany w amplitudzie. Fotodiody mogą znaleźć zastosowanie w zakresie fal podczerwonych, dla których mikrofalowe lampy fotonowe mają zbyt małą czułość, ale wady ich są podobne do wad powielaczy foto-elektronowych. Natomiast największe zalety posiada jak dotychczas mikrofalowa lampa fotonowa. Odznacza się ona nadzwyczaj szerokim pasmem transmisyjnym, aż do najwyższych częstotliwości

pracy lamp mikrofalowych, daje od razu wzmocnienie i jest dosyć czuła, przy czym czułość ta zależy głównie od materiału powierzchni fotokatody. Przez wykorzystanie zjawiska wzajemnego oddziaływania fal można za jej pomocą detekować sygnał świetlny modulowany w częstotliwości.



a) Zastosowanie mikrofalowej lampy fotonowej jako detektora światła



b) Mikrofalowa lampa fotonowa przy odbiorze superheterodynowym

Rys. 16. Zastosowania mikrofalowej lampy fotonowej

Lampa taka /rys. 16a/ składa się z fotokatody uczulonej na promieniowanie świetlne pożądanego zakresu o-

raz lampy mikrofalowej, służącej do detekcji i wzmacniania sygnału modulującego. Założmy, że padający na powierzchnię fotokatody strumień świetlny jest modulowany w amplitudzie sygnałem mikrofalowym. Wytworzy ona wówczas odpowiedni, również modulowany w amplitudzie, strumień elektronów ukształtowany w wąską wiązkę. Strumień ten jest przyspieszany i przechodzi przez elementy lampy mikrofalowej, która wzmacnia sygnał modulacyjny wielkiej częstotliwości. Lampa mikrofalowa pracuje w układzie z falą opóźnioną, przy wykorzystaniu rezonatorów lub spirali, w osi której przechodzi strumień elektronów. Takie urządzenie elektronowe może więc pracować na tych samych częstotliwościach, co normalna lampa mikrofalowa z falą bieżącą, nie ma problemu opóźnienia czasowego jak przy powielaczu fotoelektronowym. Rysunek 16b przedstawia sposób użycia lampy jako mieszacza w przypadku odbioru superheterodynowego na falach świetlnych. Obecnie jest produkowana na skalę przemysłową lampa tego typu oznaczona SY-4302, posiadająca pasmo przepuszczenia częstotliwości modulujących 1:3 /1,5 GHz - 4,5 GHz/ skupianie strumienia elektronów za pomocą magnesu stałego, powierzchnię katody oksydowaną. Musi być przy tym spełniony warunek, że odległość dwóch padających strumieni promieniowania wynosi $\frac{\text{długość fali}}{\text{średnica fotokatody}}$, inaczej bowiem bardzo szybko rosną przy odbiorze szumy.

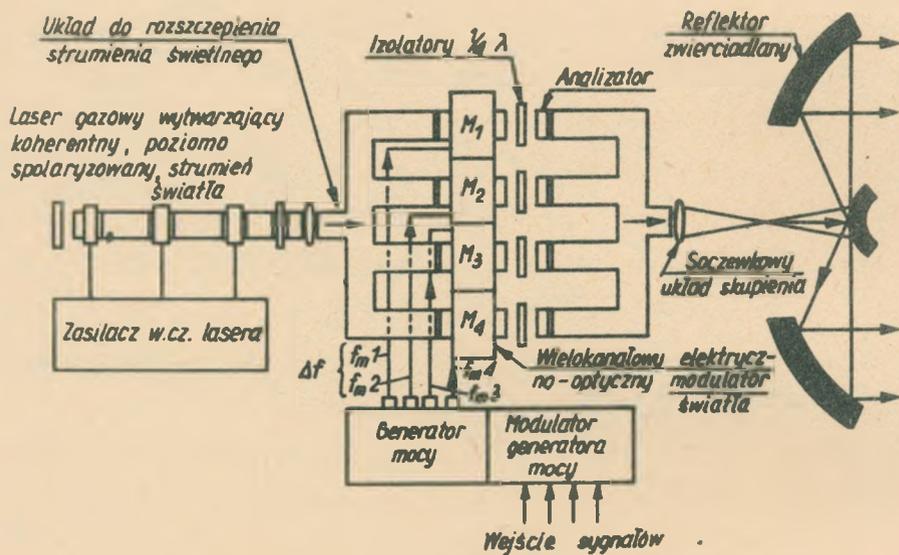
Najwłaściwsze wydaje się przy tym wykorzystanie tego typu lamp przy odbiorze superheterodynowym, a to po pierwsze dlatego, że fotokatoda posiada charakterystykę kwadratową nadającą się do wykorzystania przy mieszaniu, a

po drugie, że szerokie pasmo przepuszczania części wzmacniającej lampy pozwala wówczas na zmniejszenie wymagań co do stałości częstotliwości odbieranego sygnału świetlnego i wytwarzanego takiego samego sygnału lokalnego.

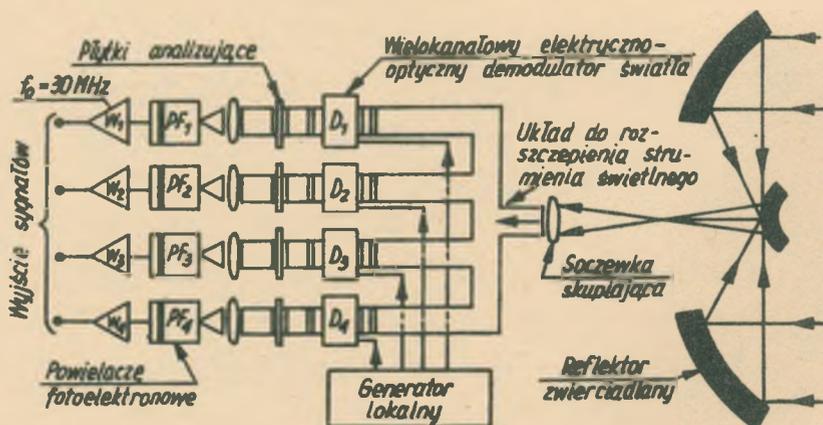
Odbiór superheterodynowy fal świetlnych będzie również niewątpliwie coraz częściej stosowany ze względu na zwiększenie czułości i zmniejszenie szumów przy odbiorze. Ponadto pozwala on na selektywny wybór częstotliwości sygnału spośród innych sygnałów świetlnych, np. pochodzenia słonecznego, na częstotliwości pośredniej zamiast na częstotliwości sygnału świetlnego. Uzyskanie odpowiedniej selektywności / 1 A° / na falach świetlnych jest niezwykle trudne, natomiast stosunkowo łatwa do uzyskania na częstotliwości pośredniej selektywność 1 GHz odpowiada szerokości pasma przepuszczania $0,016 \text{ A}^\circ$ na fali świetlnej o długości 7000 A° .

W oparciu o opisane powyżej metody modulacji i demodulacji promieniowania świetlnego zostały zaprojektowane i częściowo eksperymentalnie przebadane układy łączności wielokanałowej na falach świetlnych. Schemat blokowy nadajnika i odbiornika takiego systemu podaje rys. 17. Łączność może być w danym przypadku utrzymywana na 4 kanałach szerokopasmowych /strumień świetlny modulowany 4 sygnałami mikrofalowymi, z których każdy pozwala na transmisję pasma 30 MHz /. Na razie są to dopiero pierwsze próby, ale niewątpliwie układ taki jest przyszłościowym szerokopasmowym systemem łączności, pozwalającym w pełni wykorzystać wszystkie zalety fal świetlnych.

NADAJNIK



ODBIORNIK



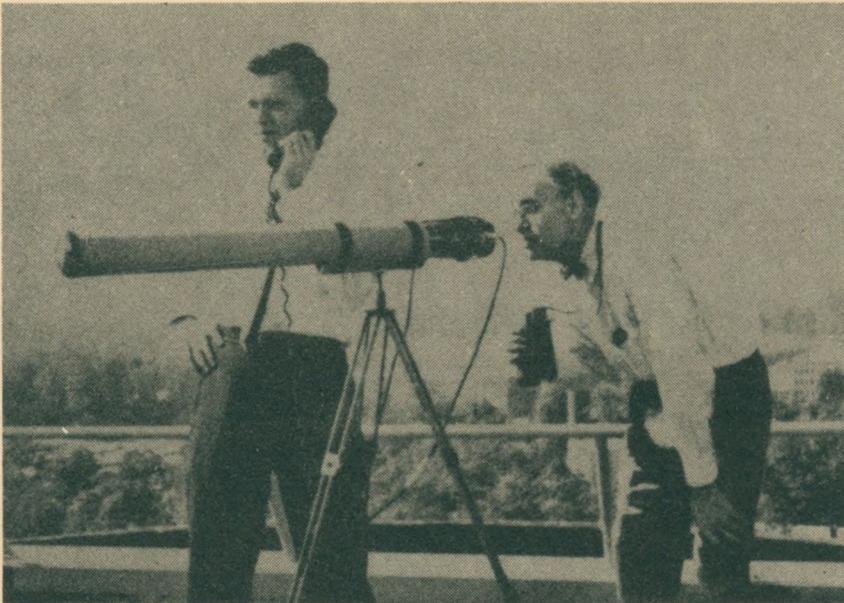
Rys. 17. System łączności wielokanałowej na falach świetlnych

Ostatnio znana firma amerykańska "General Telephone and Electronics" doniosła, że w laboratorium jej opracowano fazowy modulator o fali bieżącej koherentnego promieniowania świetlnego. Składa się on z dwóch mosiężnych prętów o długości około 1 metra każdy oraz z umieszczonego między nimi kryształu wykonanego z odpowiedniego materiału. Napięcie modulujące przyłożone na kryształ powoduje zmianę szybkości strumienia świetlnego, a powyższe dwa pręty pełnią rolę linii transmisyjnej, przez którą płynie równocześnie prąd sygnału modulującego. Dzięki wzajemnemu oddziaływaniu fali opóźnionej w kryształach oraz napięciu na prętach możliwe jest uzyskanie wyjątkowo szerokiego pasma modulacji, wynoszącego przeszło 1 GHz, przy czym potrzebna dla uzyskania tego moc sygnału modulującego wynosi zaledwie 10 W, w stosunku do dotychczas stosowanych układów modulatora koherentnego światła podane rozwiązanie pozwala na 100-krotne zmniejszenie mocy źródła modulującego przy jednoczesnym 50-krotnym poszerzeniu pasma. Jeżeli podane wiadomości nie są przesadzone, to mówiąc inaczej, oznacza to, że od tej pory można będzie w jednym szerokopasmowym kanale łączności na falach świetlnych przesłać liczbę informacji odpowiadającą sygnałom 100.000 kanałów telefonicznych lub sygnałom około 100 kanałów telewizyjnych.

9. DOTYCHCZAS PRZEPROWADZONE PROBY ŁĄCZNOŚCI ZA POMOCĄ KOHERENTNEGO PROMIENIOWANIA ŚWIETLNEGO

W rozdziale poprzednim dano przegląd najważniejszych osiągnięć łączności na falach świetlnych z punktu wi-

dzenia stosowanych układów nadawczych i odbiorczych, obecnie należy opisać przeprowadzone próby z punktu widzenia własności transmisyjnych. Przy pierwszych doświadczeniach w warunkach polowych, przy zastosowaniu po stronie nadawczej lasera z rubinem, dającego falę ciągłą o długości w pobliżu zakresu fal podczerwonych, o mocy poniżej 100 mW, uzyskano przy przesyłaniu sygnałów telefonicznych zasięg w nocy 25 - 40 km, a w pełnym świetle dziennym 10 km. Wygląd urządzenia nadawczego takiej stacji przedstawia rys. 18. Po stronie odbiorczej użyto



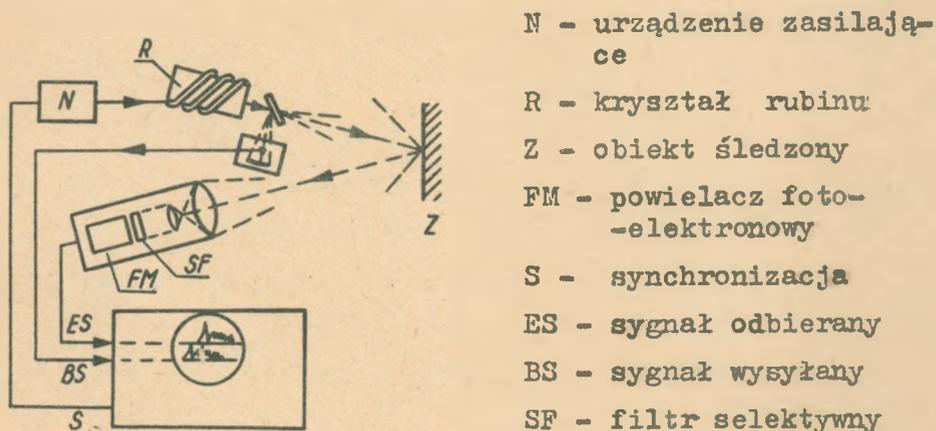
Rys. 18. Wygląd urządzenia nadawczego doświadczalnej linii łączności na falach świetlnych

powielacza foto-elektronowego, katoda którego została umieszczona w ogniskowej zwierciadła o średnicy około 20 cm. Uzyskano dobrą jakość transmisji z chwilą nawią-

zania pewnej łączności, co było dosyć trudne i wymagało zastosowania szeregu przyrządów optycznych ze względu na bardzo wąską wiązkę promieniowania, wynoszącą około $1'$.

To samo laboratorium Bella prowadziło również próby transmisji strumienia świetlnego z lasera za pomocą falowodu kołowego o średnicy kilkadziesiąt milimetrów, wypełnionego suchym powietrzem. Przy długości jego około 500 m uzyskano zupełnie dobry odbiór przy modulacji promieniowania świetlnego sygnałami o łącznej szerokości pasma 60 kHz.

Jako inny przykład może posłużyć system radaru optycznego "Colidar" /Coherent Light Detecting and Ranging/.



Rys. 19. Zasada pracy radaru "Colidar"

Zastosowano tu również laser rubinowy, który wytwarzał wiązkę promieniowania o kącie rozwarcia około $1'$, po stronie odbiorczej stosowano teleskop. Uzyskano zasięg około 5 km w dzień i 10 km w nocy, przy czym ze względu

na własności odbijające fal świetlnych od obiektów pracował on przy wykorzystaniu zjawiska echa. Duża kierunkowość promieniowania pozwoliła na osiągnięcie wielkiej dokładności namiaru zarówno położenia, jak i szybkości ruchu obiektów oraz dała doskonałą rozróżnialność obiektów. Dzięki zastosowaniu odpowiednich filtrów po stronie odbiorczej radar pracował dobrze w świetle dziennym.

Radar ten był wykorzystywany między innymi przez stacje nadmorskie, lotniska i służbę kontroli drogowej. Dokładność namierzania była tak duża, że gdyby zasięg radaru wynosił np. 100 km, to dokładność pomiaru odległości byłaby około 10 m. A oto niektóre dane systemu:

Nadajnik: Moc w impulsie: 2 kW

Czas trwania impulsu: 35 do 280 us

Długość fali: $6943 \text{ \AA} / 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

Szerokość wiązki: $1,38^\circ$

Odbiornik: Antena w postaci teleskopu o średnicy 200 m

Detektor: powielacz foto-elektronowy

Filtr: pasmo przepuszczania o szerokości

$13 \text{ \AA} / \text{ w budowie } 6 \text{ \AA} /$

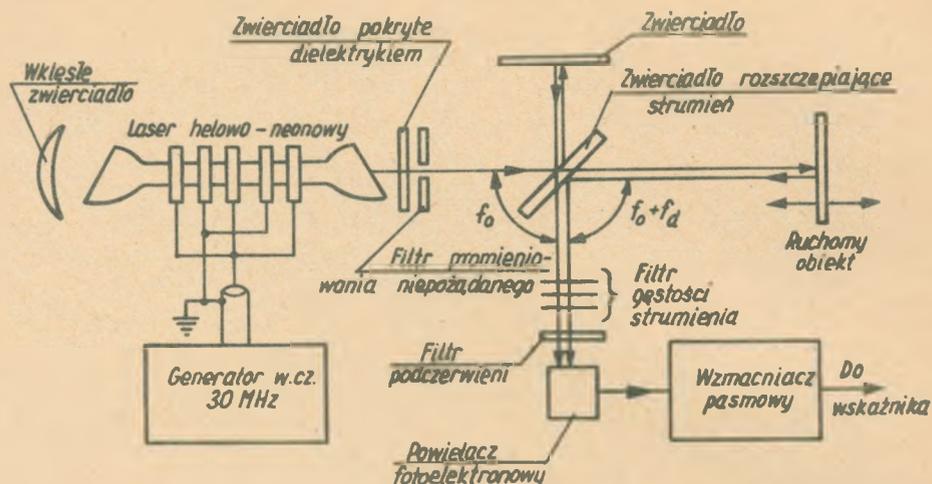
Wskaźnik: oscyloskop dwustrumieniowy.

Równolegle były prowadzone prace nad radarem dla obserwacji podwodnej /Vedar = Visible Energy Detection and Ranging/. Próby były przeprowadzone na falach odpowiadających niebiesko-zielonemu zakresowi widma fal widzialnych, dla których woda morską jest najbardziej przepuszczalna. Ponieważ nie posiadano odpowiedniego lasera, stosowano lampę łukową o mocy 250 W ze zwierciadłem para-

bolicznym. Podobne zwierciadło w połączeniu z powielaczem fotoelektronowym stanowiło część odbiorczą urządzenia. Zasięg wynosił około 1 km. Specjalny filtr wąskopasmowy zmniejszał wpływ szkodliwych odbić i szumów zewnętrznych. Radar ten wykazał wiele podstawowych zalet w stosunku do radaru na falach dłuższych.

Innym osiągnięciem z tej dziedziny może być urządzenie radarowe, pracujące przy wykorzystaniu zjawiska Dopplera, z laserem neonowo-helowym dającym falę ciągłą o długości 11530 \AA i mocy wyjściowej około 1 mW. Zastosowanie tak krótkiej fali pozwoliło na osiągnięcie dokładności pomiaru 10.000 razy większej niż przy konwencjonalnym radarze mikrofalowym. Pomiar szybkości był możliwy w granicach 5 km/sek do 0,003 cm/sek. Zasięg radaru wynosił około 50 km, tak że należy się spodziewać, iż po zwiększeniu mocy nadawania do 1 kW wyniósłby około 1500 km. W porównaniu z urządzeniem radarowym które pracuje w mikrofalowym pasmie L, posiada moc wyjściową około 10 MW i waży przeszło 100 kg, kompletne urządzenie na falach świetlnych wykonane w warunkach produkcyjnych, przy założeniu mocy wyjściowej 10 W, powinno ważyć 10 - 15 kg, mimo tak jeszcze niedoskonałej techniki budowy laserów /rys. 20/.

Obliczono, że przy mocy wyjściowej 1 kW i zastosowaniu zwierciadła skupiającego o średnicy około 1 m zasięg radaru wyniósłby około 400.000 km, przy czym wiązka strumienia byłaby tak wąska, że na przykład na powierzchni księżycy oświetliłaby powierzchnię o średnicy zaledwie 2,5 km.



Rys. 20. Zastosowanie lasera helowo-neonowego dla radaru pracującego z wykorzystaniem zjawiska Dopplera

Inne badania poszły w kierunku wykorzystania fal świetlnych do celów łączności Ziemi z obiektami kosmicznymi, a zwłaszcza bezpośredniej łączności między pojazdami kosmicznymi /nie występuje sprawa tłumienia atmosferycznego/. Obliczenia teoretyczne wykazały, że już w obecnych warunkach technicznych nie byłoby większych trudności z uzyskaniem potrzebnych mocy i szerokości pasm modulacji. Jedyne trudności mogą wystąpić ze względu na konstrukcję samych urządzeń /dość skomplikowane i jeszcze wymiarowo duże/ oraz przy nawiązywaniu i utrzymaniu ciągłej łączności przy tak wąskich wiązkach kierunkowych. Obliczono, że w zakresie fal świetlnych do przesyłania na trasie: Ziemia - Mars informacji odpowiadających 10^6 bit/sek potrzebna moc byłaby 100 W, przy

średnicy zwierciadła anteny nadawczej 10 cm i odbiorczej 100 cm.

W odniesieniu do łączności Ziemia - przestrzeń kosmiczna oraz łączności na powierzchni Ziemi, możliwe do uzyskania zasięgi zależą tu głównie od długości fali ze względu na charakterystykę tłumienia atmosfery. Tak więc mimo nieco mniejszej kierunkowości promieniowania i węższego pasma bardziej odpowiednie są fale podczerwone i leżące w ich pobliżu fale świetlne, niż fale świetlne zielone czy fioletowe, które z kolei mają zalety przy łączności poza warstwą atmosfery ziemskiej. Liczne próby wykazały, że najlepiej przenikają przez atmosferę fale podczerwone ale jak na razie są jeszcze trudności z generacją tych długości fal przez lasery.

Z tego też między innymi względu nie poniechano prób nad wynalezieniem innych źródeł generacji fal świetlnych. Pod koniec 1962 roku została na przykład zamieszczona w prasie fachowej wiadomość o opracowaniu lampy elektronowej, której zasady pracy mogą być wykorzystane zarówno przy generacji mikrofal i fal milimetrowych, jak i fal podczerwonych, świetlnych, nadfioletowych. Częstotliwość promieniowania w każdym konkretnym zakresie może być zmieniana w sposób ciągły przez regulację napięcia przyspieszającego strumień elektronów. Promieniowanie jest do pewnego stopnia koherentne, przy czym wynalazca zapowiada dalszą poprawę tego parametru przy następnych próbach. Strumień świetlny może być modulowany w amplitudzie lub częstotliwości, przy czym wymagana moc sygnału jest stosunkowo mała. Jeżeli wia-

domości te nie są przesadzone, oznacza to duży krok naprzód w dziedzinie udoskonalenia i szybkiego rozpowszechnienia łączności na falach znacznie krótszych od obecnie wykorzystywanego zakresu mikrofalowego.

10. ŁACZNOŚĆ NA FALACH NADFIOLETOWYCH

Teoretycznie biorąc fale nadfioletowe posiadają cały szereg dalszych zalet w stosunku do omówionych uprzednio zakresów fal. Po pierwsze, dzięki małemu promieniom waniu na tych długościach fal Słońca oraz innych planet i gwiazd, nie występują praktycznie żadne zakłócenia wewnętrzne i łączność na tych falach powinna się odznaczać, przy tych samych pozostałych parametrach, najlepszym stosunkiem sygnału do szumów. Po drugie, małe długości fal pozwalają na osiągnięcie potrzebnej kierunkowości nadawania przy jeszcze mniejszych w porównaniu do długości fal świetlnych wymiarach anten lub ściślej mówiąc układów optycznych. Łączność na tych falach zapewnia ponadto całkowitą tajność przesyłanych informacji.

Jednakże jak dotychczas, praktycznym wykorzystaniem tego zakresu fal interesowano się najmniej. Wpłynęły na to w równej mierze: brak na razie odpowiednich układów dla generacji tych fal /dotychczas opracowane lasery pokrywają z ledwością zakres fal świetlnych/ jak i niemożność użytkowania tak krótkich fal przez systemy łączności na powierzchni Ziemi z powodu silnego ich pochłaniania przez atmosferę ziemską /wymiaru cząsteczek porównywalne z długością fali/. Dlatego tu rozważa się ich wykorzystanie głównie pod kątem zastosowania do celów łączności między pojazdami kosmicznymi.

W 1960 roku w Stanach Zjednoczonych przeprowadzono pierwsze próby łączności na falach nadfioletowych, w trakcie których były przesyłane na krótkie odległości sygnały telewizyjne i telefoniczne. Jako światło niekoherentnego promieniowania tych fal zastosowano lampę oscyloskopową z ekranem pokrytym odpowiednio spreparowaną warstwą fosforu. Strumień elektronów padając na tę warstwę powodował wysyłanie przez nią promieniowania nadfioletowego. Przez zmianę natężenia strumienia elektronów uzyskiwano modulację amplitudy wysyłanego promieniowania. Inny rodzaj modulacji był zresztą niemożliwy ze względu na niekoherentność tego promieniowania.

Jak podano w literaturze, przy wykorzystaniu podobnego typu źródła o mocy promieniowania około 1 W można przenieść wąskie pasmo informacji na odległość rzędu 30 milionów kilometrów /sygnał potrzebuje na jej przebycie 100 sekund!/. Szerokość wiązki kierunkowej potrzebnej do tego celu wynosi $2'$, co odpowiada zyskowi anteny 77 dB.

Dalszy rozwój prac w tej dziedzinie jest uzależniony od uzyskania dużej mocy ze źródeł generacji tych fal oraz wynalezienia odpowiednio czułych i sprawnych detektorów. Jeżeli weźmiemy pod uwagę generację fal nadfioletowych, to wielkie nadzieje czynią w tym kierunku ostatnio przeprowadzone próby z wytwarzaniem przez lasery wyższych harmonicznych sygnału pobudzającego. Tak więc na przykład strumień monochromatycznego światła o dużym natężeniu i o długości fali 7000 \AA , co odpowiada czerwonemu prążkowi widma widzialnego, skiero-

wywano na poddany odpowiednim procesom kryształ kwarcu. Na wyjściu uzyskano strumień promieniowania o długości fali 3500 \AA° /druga harmoniczna/, leżący już na granicy zakresu fal widzialnych. Strumień ten był jeszcze bardzo słaby, tak że nie można go było wykorzystać do prób łączności, tym niemniej pierwszy krok w kierunku generacji koherentnego promieniowania nadfioletowego został uczyniony. Dalsze doświadczenia pójdą w kierunku uzyskania większej sprawności tego procesu "powielania częstotliwości" oraz wytwarzania jeszcze wyższych harmonicznych sygnału pobudzającego. Można dodać, że zjawisko generacji wyższych harmonicznych wygląda również bardzo obiecująco z punktu widzenia wytwarzania dłuższych fal, na przykład milimetrowych, które na tej drodze udałoby się uzyskać za pomocą fal z zakresu mikrofalowego.

11. PERSPEKTYWY ROZWOJU ŁĄCZNOŚCI NA FALACH KRÓTSZYCH OD OBECNIE WYKORZYSTYWANEGO ZAKRESU FAL RADIOWYCH

Uczeni wiedzą obecnie już dosyć, aby zdawać sobie sprawę z potencjalnych możliwości systemów łączności pracujących z wykorzystaniem koherentnego promieniowania świetlnego, natomiast zbyt mało jeszcze są udoskonalone urządzenia techniczne i zbyt mało przeprowadzono prób, aby można było dyskutować o parametrach konkretnych linii łączności. Nie należy zapominać, że do czasu zbudowania pierwszego modelu lasera, który mógł być już wykorzystany do przesyłania informacji, upłynęło niecałe

trzy lata, a literatura dostarcza danych odnoszących się do prób przeprowadzonych najpóźniej około roku temu. Możemy być pewni, że od tego czasu uczeni i technicy nie próżnowali, lecz kontynuowali dalej prace badawcze i próby, o czym świadczą wzmianki w prasie.

Wynalezienie lasera, który wytwarza koherentny, o dużym natężeniu i kierunkowości, strumień światła o określonej ściśle długości fali, o właściwościach niespotykanych w naturze, jest już samo w sobie olbrzymim postępem w dziedzinie techniki. Wykorzystanie jego jest możliwe w wielu dziedzinach, nie tylko łączności, że wymienią się tylko medycynę /operacje oka/, metalurgię /wiercenie bardzo cienkich otworów i wytwarzanie wysokich temperatur/, pomiary wielu parametrów, m.in. szybkości i odległości /na tej drodze będzie można na przykład potwierdzić dokładnie teorię względności/, szybkościową mikrofotografię, chemię /źródło światła dla fotosyntezy i spektroskopii/, meteorologii /wykrywanie chmur/, geodezji i kartografii itp.

Z punktu widzenia komunikacji jest jednak dla nas najważniejsze zastosowanie techniki fal świetlnych dla łączności na powierzchni Ziemi i w przestrzeni kosmicznej. Przyszły rozwój sieci łączności na falach świetlnych na powierzchni Ziemi jest rzeczą nie podlegającą dyskusji, zmusi bowiem do tego potrzeba przesyłania stale wzrastającej liczby informacji. Oblicza się, że około roku 1970 w najbardziej gospodarczo rozwiniętych krajach świata trzeba będzie przesyłać w jednym kanale radiowym około 20.000 sygnałów kanałów telefonicznych /o-

becnie liczba ta wynosi poniżej 1000/, co byłoby niemożliwe bez wykorzystania fal świetlnych. Przez wykorzystanie zakresu tych fal usunie się prawdopodobnie na zawsze problem zagęszczenia pasm radiowych; wystarczy powiedzieć, że sam zakres fal świetlnych widzialnych pozwoli na przesłanie około 100 bilionów sygnałów kanałów telefonicznych lub ponad 50 milionów sygnałów kanałów telewizyjnych.

Pytanie może być tylko, w jak szybkim tempie łączność ta rozwinie się, lecz odpowiedzieć na to w oparciu o konkretne możliwości techniczne i ekonomiczne będzie można dopiero po upływie pewnego wstępnego okresu prób i badań, który powinien zakończyć się około 1965 roku. Pewne jest tylko, że wzrastające potrzeby będą najlepszym dopingiem dla ich realizacji.

Jeżeli weźmiemy pod uwagę konkretnie wykorzystywane zakresy, to przewiduje się wykorzystanie fal milimetrowych, podczerwonych i części dłuższych fal świetlnych zakresu widzialnego przez służby łączności na powierzchni Ziemi /mniejsze tłumienie atmosfery/, a fal krótszych przez służby łączności z obiektami kosmicznymi a zwłaszcza między nimi. W tym ostatnim przypadku zadaniem będzie w równej mierze zapewnienie łączności, jak wykorzystanie tych fal przez różnego typu urządzenia radiolokacyjne przeznaczone do namierzania, wykrywania, a zwłaszcza prowadzenia pojazdów kosmicznych. Prace w tym kierunku mają szczególnie wielkie znaczenie ze względu na obecnie wyraźnie się zaznaczającą erę lotów międzyplanetarnych i podboju przestrzeni kosmicznej.

