

8. ISTOTA ELEKTROMAGNETYZMU

Stacjonarne pole magnetyczne oraz stacjonarne pole elektryczne to pojęcia, dla których istnieją całkowicie odrębne opisy matematyczne (rozdział 4). Natomiast jeżeli pola te zmieniają się w czasie, mamy do czynienia z jednolitym opisem matematycznym pojęcia zwanego polem elektromagnetycznym. Zjawiska zmiennych pól magnetycznych i elektrycznych związane są z ruchami ładunków elektrycznych (prądami elektrycznymi) i tak są opisywane. Istnieje tradycyjny sposób opisu zjawisk elektromagnetycznych. Składa się na niego szereg równań, w tym cztery z nich to tzw. równania Maxwella, a jedno – tzw. "siła Lorentza". Równania Maxwella formułowane są w postaci różniczkowej (tab. 8.1) lub całkowej (tab. 8.2).

$\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$	$\text{rot } \vec{E} = \nabla \times \vec{E} = \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)\mathbf{i} + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right)\mathbf{j} + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)\mathbf{k}$
	operator Nabla: $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}$ $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ - wersory (wektory jednostkowe) kierunków x, y, z w kartezjańskim układzie współrzędnych
$\text{rot } \vec{H} = -\frac{d\vec{D}}{dt} + \vec{j}$	
$\text{div } \vec{B} = 0$	$\text{div } \vec{B} = \nabla \cdot \vec{B} = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z}$
$\text{div } \vec{D} = \rho$	
\vec{E} - natężenie pola elektrycznego \vec{D} - indukcja pola elektrycznego $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ ε - przenikalność dielektryczna \vec{E} - natężenie pola elektrycznego \vec{H} - natężenie pola elektrycznego - natężenie pola magnetycznego \vec{B} - natężenie pola elektrycznego - indukcja pola magnetycznego $\vec{B} = \mu \vec{H}$ μ - przenikalność magnetyczna $[E] = \text{kg m s}^{-3} \text{ A}^{-1}$ $[B] = \text{kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}$ $[H] = [B] [\mu]^{-1}$ $[D] = [H] [\varepsilon]$ $[\varepsilon] = \text{A}^2 \text{ s}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-3}$ $[\mu] = \text{kg m s}^{-2} \text{ A}^{-2}$	

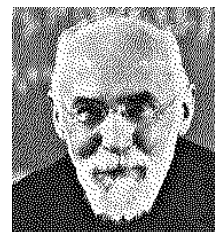
Tab. 8.1. Równania Maxwella w postaci różniczkowej

$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{d}{dt} \Phi_B$	L - krzywa zamknięta ograniczająca powierzchnię S ... z równania wynika prawo indukcji Faradaya
$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \Phi_E \right)$... z równania wynika, że źródłem pola magnetycznego jest zmienne pola elektryczne, lub/i przepływające prądy
$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	S - dowolna powierzchnia zamknięta ... z równania wynika, że nie istnieją ładunki magnetyczne (które mogłyby być źródłem pola)
$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} q$	q - suma ładunków przestrzeni wewnątrz powierzchni zamkniętej S ... z równania wynika, że strumień pola elektrycznego przenikającego pewną powierzchnię jest proporcjonalny do ładunku elektrycznego zawartego w przestrzeni ograniczonej tą powierzchnią

Tab. 8.2. Równania Maxwella w postaci całkowej

Konsekwencje rozwiązań równań Maxwella są różnorakie. Kształt owych rozwiązań zależy od tzw. warunków brzegowych i opisu zmian pól na granicach nieciągłości ośrodków. Ponadto z równań tych uzupełnionych równaniem na „siłę Lorentza”, można otrzymać wszystkie prawa elektrodynamiki klasycznej. Z równań Maxwella odniesionych do pustej przestrzeni wywnioskowano w roku 1864 istnienie fal elektromagnetycznych (odkrytych później przez Heinricha Hertza).

LORENTZ Hendrik Antoon (1853-1928), wybitny fizyk holenderski, profesor uniwersytetu w Lejdzie, dyrektor Instytutu Teylera w Haarlemie, laureat Nagrody Nobla w 1902 (wraz z P. Zeemanem) za badanie wpływu magnetyzmu na promieniowanie elektromagnetyczne. Badał także zjawiska przewodnictwa cieplnego i elektrycznego. Prekursor fizyki relatywistycznej. W latach 1892-1893 rozwinął koncepcję efektu relatywistycznego polegającego na skracaniu się długości poruszających się przedmiotów (Lorentza-Fitzgeralda skrócenie, Lorentza transformacja).



8.1. Powstawanie fal elektromagnetycznych, propagacja i oddziaływanie z materią

Z równań Maxwella zastosowanych w przestrzeni pozbawionej ładunków i prądów otrzymać można tzw. równanie falowe (8.1.1):

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (8.1.1)$$

Równanie 8.1.1 jest spełnione przez rozwiązanie (8.1.2) reprezentujące ruch falowy:

$$E_x(t, z) = E_{x0} \cos(\omega(t - \sqrt{\epsilon\mu} z)) \quad (8.1.2)$$

gdzie: ω - częstość fali (czyli częstotliwość f pomnożona przez 2π)

Powyższe rozwiązanie po wstawieniu do równań Maxwella implikuje kolejną funkcję:

$$H_y(t, z) = H_{y0} \cos(\omega(t - \sqrt{\epsilon\mu} z)) \quad (8.1.3)$$

Funkcje 8.1.2 i 8.1.3, w przełożeniu na rzeczywistość fizykalną, stanowią opis fali elektromagnetycznej o częstotliwości ω i szybkości $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$. Drgania pola elektrycznego

MAXWELL James Clerk (1831-1879), wybitny szkocki fizyk, profesor uniwersytetu w Aberdeen (1856-1860), Kings College w Londynie (1860-1865) i Cambridge (po 1871), organizator i pierwszy dyrektor *Cavendish Laboratory* w Cambridge. Autor wybitnych prac teoretycznych dotyczących podstaw elektrodynamiki klasycznej (Maxwella równania, 1864), kinetycznej teorii gazów (Maxwella-Boltzmannna rozkład, Maxwella prawo rozkładu, 1860), optyki i teorii barw (np. Maxwella zjawisko) oraz stabilności grawitacyjnej pierścieni Saturna.

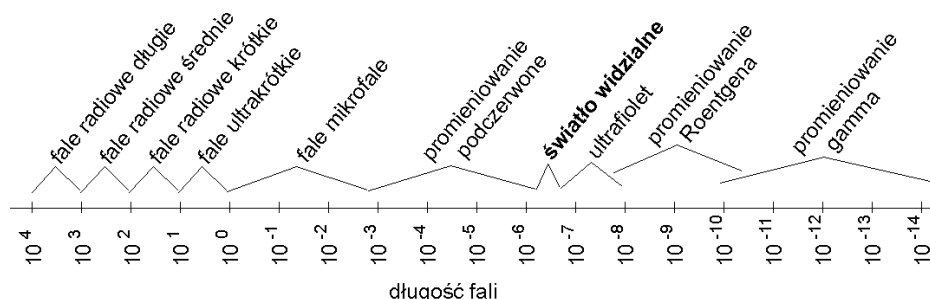


zachodzą w kierunku prostopadłym do kierunku drgań pola magnetycznego. Obydwa pola drgają poprzecznie do kierunku rozchodzenia.

Sposób powstawania/wytwarzania fal elektromagnetycznych, sposób ich rozprzestrzeniania się, a także sposób oddziaływania z materią - zależą od długości fali. Długość fali stanowi kryterium klasyfikacji fal elektromagnetycznych (rozdz. 8.1.1).

8.1.1. Klasyfikacja fal elektromagnetycznych

Wszystkie rodzaje fal elektromagnetycznych powstają w sposób naturalny albo są sztucznie wytwarzane. Najdłuższymi falami, jakie można wytwarzać oraz rejestrować, są fale radiowe długie. Trudno natomiast ustalić długość fal najkrótszych. W zasadzie im krótsza fala określonego promieniowania, tym łatwiej wykazać korpuskularną naturę tego promieniowania. Odpowiedź na pytanie: czy dany rodzaj promieniowania zaliczyć do fal elektromagnetycznych, czy do strumienia cząstek – zależy od metody obserwacji. Przykładowo: jeżeli chcemy zmierzyć długość fali światła użyjemy siatki dyfrakcyjnej, czyli wykorzystujemy falową naturę promieniowania. Jeżeli zamierzamy wykryć/zarejestrować strumień światła – użyjemy fotokomórki – a zjawisko fotoelektryczne jest dowodem na korpuskularną naturę światła. Tradycyjny podział fal elektromagnetycznych na poszczególne pasma ich długości przedstawiony jest na rys. 8.1.1.1.



Rys. 8.1.1.1. Przedziały fal elektromagnetycznych o różnych długościach.

8.1.2. Rozchodzenie się fal elektromagnetycznych

Właściwości propagacyjne fal elektromagnetycznych zależą od ich długości. Bardzo ważne w telekomunikacji jest rozchodzenie się fal w falowodach, w atmosferze, w wodzie i przestrzeni kosmicznej. W przypadku tzw. światłowodów analizowane jest rozchodzenie się fal z zakresu widzialnego, bliskiego ultrafioletu i bliskiej podczerwieni.

Podstawowym zjawiskiem fizycznym istotnym w propagacji fal jest zjawisko ugięcia kierunku rozchodzenia się fal oraz zjawisko absorpcji.

8.4. Widmo promieniowania elektromagnetycznego

Funkcja, która pozwala określić jaka część energii promieniowania elektromagnetycznego mieści się w określonym przedziale długości fal, to tzw. widmo $f(\lambda)$. Jeżeli udałoby się przyporządkować ilości energii ΔE w kolejnych małych przedziałach długości fal $\Delta\lambda$, otrzymalibyśmy zbiór ilorazów

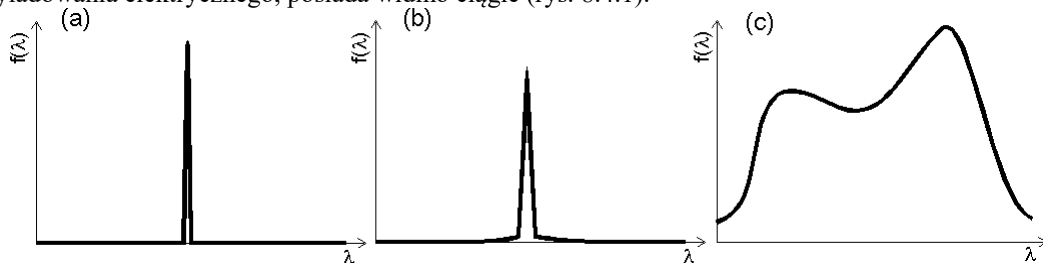
$\frac{\Delta E}{\Delta \lambda}$, który byłby w pełni tożsamy ze zbiorem wartości funkcji $f(\lambda)$ gdyby $\Delta \lambda$ dążyło do zera. Zatem widmo, to pochodna energii promieniowania względem długości fali:

$$f(\lambda) = \frac{dE}{d\lambda} \quad (8.4.1)$$

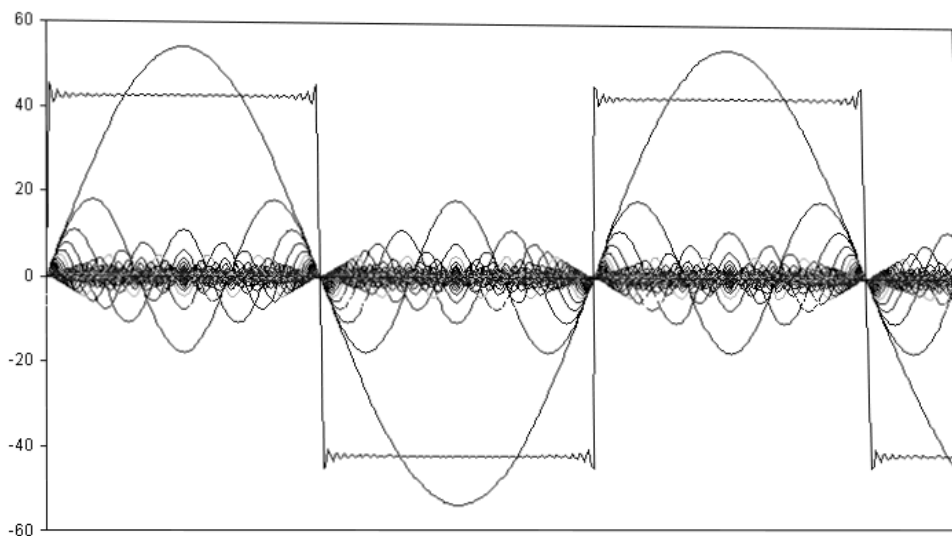
Chcąc określić ilość energii w przedziale długości fal od λ_1 do λ_2 należy wyliczyć całkę:

$$E(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda \quad (8.4.2)$$

Widmo promieniowania doskonałego nadajnika radiowego jest w okresach braku modulacji zbliżone do liniowego. W momencie rozpoczęcia modulacji, niezależnie czy częstotliwościowej czy amplitudowej, widmo poszerza się. Pojedynczy impuls elektromagnetyczny, np. w wyniku wyładowania elektrycznego, posiada widmo ciągłe (rys. 8.4.1).



Rys.8.4.1. Przykładowe widma promieniowania:
 (a) fali nośnej z anteny nadajnika radiowego,
 (b) zmodulowanej fali z nadajnika radiowego,
 (c) widmo ciągłe.



Rys.8.4.2. Składanie wyrazów szeregu Fouriera w przypadku przebiegu prostokątnego.

Każdy przebieg opisany określoną funkcją można rozłożyć na skończony lub nieskończony szereg składający się funkcji sinusoidalnych – w tzw. szereg Fouriera. Przebieg prostokątny to funkcja, która w przedstawieniu Fouriera ma następująca postać:

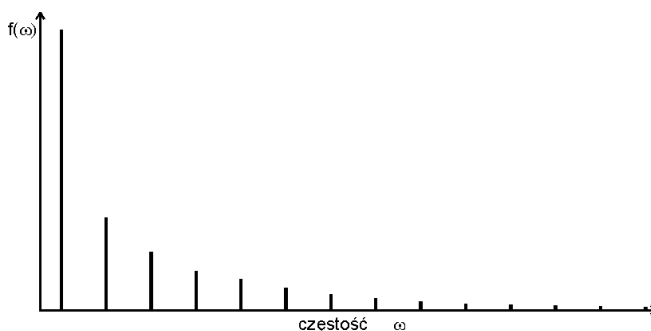
$$f(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(b_n \sin\left(\frac{\pi n}{T} t\right) + a_n \cos\left(\frac{\pi n}{T} t\right) \right) \quad (8.4.1)$$

gdzie: $a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \cos \frac{\pi n}{T} t dt$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \sin \frac{\pi n}{T} t dt$$

Na rys. 8.4.2 znajduje się przykład rozłożenia przebiegu prostokątnego. W przykładzie tym pokazano wynik złożenia kilkudziesięciu pierwszych wyrazów szeregu. Efekt doskonałego przebiegu prostokątnego byłby osiągnięty dopiero po złożeniu nieskończonej ilości wyrazów. Widmo przebiegu prostokątnego, tak jak widmo dowolnego przebiegu cyklicznego, ma charakter dyskretny (rys. 8.4.3).

Fourier Jean Baptiste Joseph (1768-1830), matematyk, fizyk i polityk francuski (napoleoński gubernator Dolnego Egiptu i prefekt departamentu *Isère*). Był prekursorem fizyki matematycznej. Opracował teorię przewodnictwa cieplnego oraz metodę rozkładu funkcji na szeregi trygonometryczne (tzw. analiza fourierowska lub rozkład na szereg Fouriera, transformata Fouriera).



Rys.8.4.3. Widmo przebiegu prostokątnego.

8.5 . Twórcy elektrodynamiki i radiokomunikacji

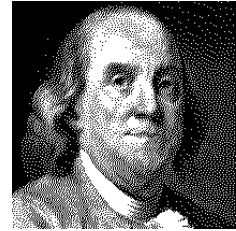
Równania Maxwella (1864) stanowią ujednocioną teorię ujmującą prawa wcześniej formułowane przez Twórców elektrodynamiki. Do najbardziej znanych zaliczają się:

GILBERT William (1540-1603), angielski lekarz i fizyk, nadworny lekarz królowej Elżbiety I i króla Jakuba I, pionier prac nad zjawiskami magnetycznymi i elektrycznymi, obalił pogląd o pozaziemskiej naturze pola magnetycznego obserwowanego na Ziemi. Odkrył indukcję magnetyczną i elektryzowanie się różnych ciał przez pocieranie (przed nim zjawisko to było znane wyłącznie dla elektronu). Wprowadził termin "elektryczny" dla tego typu oddziaływań (od elektron - greckiej nazwy bursztynu używanego w doświadczeniach). Niezgodnie z prawdą ustalił brak związku między elektrycznością a magnetyzmem, co wywarło poważny wpływ na dalszy rozwój badań w tym kierunku.

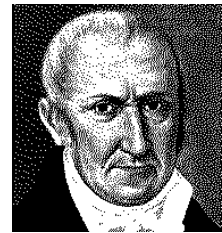


FRANKLIN Benjamin (1706-1790), uczony, filozof i polityk amerykański. W 1765 Franklin przedstawił w Londynie projekt statusu prawnego brytyjskich kolonii w Ameryce Północnej. Projekt nie został przyjęty, a rząd brytyjski w dalszym ciągu forsował zwiększanie podatków i restrykcyjną politykę w stosunkach ze swoimi terytoriami zamorskimi. W 1775, po wybuchu wojny skierowanej przeciwko brytyjskiej dominacji, Franklin obok Waszyngtona był jednym z głównych organizatorów armii i państwa amerykańskiego. W 1776 oddelegowany przez Kongres do Francji, doprowadził do podpisania traktatu sojuszniczego. Uczestniczył w podpisywaniu traktatu pokojowego z Wielką Brytanią w 1783 w Wersalu. Jeden z autorów konstytucji Stanów Zjednoczonych. Jako wyznawca abolicjonizmu, założył w 1775 Towarzystwo za Zniesieniem Niewolnictwa.

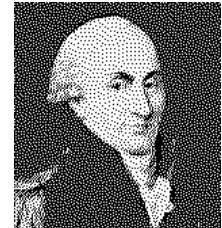
Od 1748 pracował nad badaniem zjawiska elektryczności, wprowadzając pojęcie elektryczności dodatniej i ujemnej. Badał zjawisko wyładowań atmosferycznych, skonstruował pierwszy piorunochron (1752).



VOLTA Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio (1745-1827), fizyk włoski. Profesor na uniwersytetach w Como i Padwie. Pionier badań nad elektrycznością: wynalazł elektrofor (1775), kondensator (1782) i ogniwo złożone z elektrod srebrnej i cynkowej oraz wody morskiej jako elektrolitu (tzw. ogniwo Volty, 1800). Badał wpływ elektryczności na organizmy żywe.

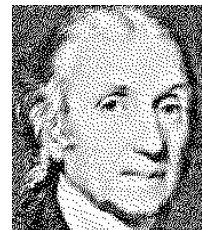


COULOMB Charles Augustin (1736-1806), fizyk francuski, oficer wojsk inżynierskich, członek Akademii Nauk. Badacz zjawisk magnetycznych i elektrycznych oraz teorii maszyn prostych. W 1785 sformułował prawo elektrostatyki, nazywane dziś jego imieniem. Wprowadził pojęcie momentu magnetycznego, odkrył zjawisko ekranowania pola elektrycznego.

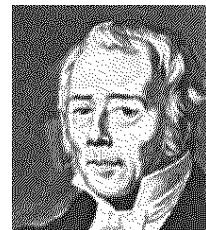


CAVENDISH Henry (1731-1810), chemik i fizyk angielski, członek Royal Society. Odkrył wodór i azot, ustalił skład powietrza, wody, kwasu azotowego. Wyznaczył względną gęstość dwutlenku węgla. Badał rozpuszczanie metali w kwasach. Odkrył zasadę równoważności (prawo stosunków równoważnych). Obliczył gęstość kuli ziemskiej. Zajmował się procesami gnicia i fermentacji.

Za pomocą skonstruowanej przez siebie wagi skręceń wyznaczył wartość stałej grawitacji przez co otrzymał masę Ziemi. H. Cavendish prowadził również prace w zakresie elektrostatyki, wprowadził pojęcie potencjału elektrostatycznego, odkrył (ale nie ogłosił) prawa zwane dzisiaj prawami Coulomba i Ohma.



OERSTED Hans Christian (1777-1851), fizyk i lekarz duński, profesor uniwersytetu w Kopenhadze od 1806. Prowadził pionierskie prace nad zjawiskami elektrycznymi i magnetycznymi, stwierdził (1813) tożsamość sił elektrycznych i chemicznych, odkrył (1820) powstawanie pola magnetycznego przy przepływie prądu elektrycznego.

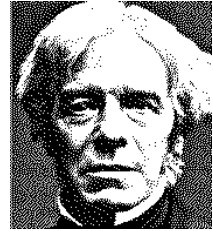


BIOT Jean Baptiste - zob. str.

SAVART Félix - zob. str.

AMPERE André Marie - zob. str.

FARADAY Michael (1791-1867), fizyk i chemik angielski, profesor Instytutu Królewskiego i uniwersytetu w Oksfordzie, członek Royal Society, w młodości asystent H.B. Davy'ego. Przeprowadził pierwsze prace nad stalami stopowymi i szkłem optycznym. Twórca prostej metody skraplania gazów, wydzielił benzen, naftalen, heksachloroetan, koloidalne złoto. Stwierdził katalityczne działanie światła w reakcjach chlorowców na węglowodory. Odkrył prawa elektrolizy i wprowadził nomenklaturę dla opisu tego zjawiska. Odkrył zjawisko indukcji elektromagnetycznej i samoindukcji. Skonstruował pierwszy model silnika elektrycznego. Badał diamagnetyzm i odkrył paramagnetyzm. Odkrył zjawisko skręcania płaszczyzny światła spolaryzowanego przez substancje optycznie nieaktywne, po umieszczeniu ich w polu magnetycznym - nazwane zjawiskiem Faraday'a.



HERTZ Heinrich Rudolf (1857-1894), wybitny fizyk niemiecki, profesor politechniki Karlsruhe i uniwersytetu w Bonn, odkrywca fal elektromagnetycznych i efektu fotoelektrycznego zewnętrznego, uważany za jednego z głównych sprawców późniejszego rozwoju radiokomunikacji.



Popow Aleksandr Stiepanowicz (1859-1906), fizyk rosyjski. Pionier radiotechniki. Od 1901 profesor i od 1905 dyrektor Petersburskiego Instytutu Elektrotechnicznego. Na podstawie doświadczeń H.R. Hertza badał rozchodzenie się, polaryzację, odbicie i załamanie fal elektromagnetycznych celem użycia ich do przenoszenia sygnałów.

Ulepszył koherer fizyka francuskiego É. Branly'ego przez przyłączenie do niego odcinka przewodu pełniącego funkcję anteny. 1894 skonstruował detektor burz.

1895-1897 zbudował, niezależnie od G. Marconiego, zespół nadawczo-odbiorczy pozwalający przesyłać na odległość sygnały radiowe, kodowane telegraficznym alfabetem Morse'a. Zastosował też strojenie odbiornika i odbiór przez słuchawkę.



Marconi Guglielmo (1874-1937), włoski elektrotechnik i wynalazca. W latach 1895-1897 skonstruował radio, wynalazł antenę. Rozpoczął nawiązywanie łączności radiowej (1899 - przez kanał La Manche, 1901 - przez Ocean Atlantycki). Uehonorowany w 1909 (wraz z K.F. Braunem) Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki.



MORSE Samuel Finley Breese (1791-1872), amerykański malarz i wynalazca. W latach 1837-1840 skonstruował telegraf elektromagnetyczny i opracował dlań specjalny alfabet telegraficzny złożony z kombinacji kropek i kresek. W komunikacji morskiej alfabet Morse'a będzie można używać do 1 stycznia 1999. Współczesne statki korzystają bowiem z klasycznej łączności radiowej oraz coraz częściej stosowanych telefonów satelitarnych.

