

GUGLIELMO MARCONI: DALLA NAVIGAZIONE A VISTA ALLA NAVIGAZIONE STRUMENTALE

*Stefano Selleri*¹

La navigazione marittima più antica si basava, in specchi d'acqua relativamente piccoli, qual è il Mediterraneo, sul cabotaggio. Era possibile anche la navigazione astronomica con strumenti primitivi, quando disponibili. Sorprendente infatti è la capacità dei Polinesiani di diffondersi in tutto l'Oceano Pacifico dal 3000 a.C. al 900 a.C. senza l'ausilio di alcun dispositivo.

I primi strumenti furono il quadrante, descritto da Tolomeo intorno al 150 d.C. [1] ma forse molto più antico, e utilizzato per ricavare la latitudine tramite la misurazione dell'altezza sull'orizzonte di una stella o del Sole. Ulteriori miglioramenti avvennero grazie a Teone di Alessandria con l'invenzione dell'astrolabio, uno strumento che permetteva anche di identificare le stelle nel cielo in base alla stagione [2]. In oriente, in Cina, la bussola, derivata dalla scoperta, nel II secolo a.C., delle proprietà degli aghi magnetizzati di orientarsi nel campo magnetico terrestre, fu applicata alla navigazione a metà dell'XI secolo della nostra era [3] e a metà del XII secolo in Europa [4, 5].

L'astrolabio si sviluppò infine nell'astrolabio nautico, più pratico per la determinazione della longitudine su una nave con il suo rollio e beccheggio, intorno al XII secolo [6]. Un ulteriore passo avanti fondamentale fu l'ottante, precognizzato da Isaac Newton alla fine del XVII secolo ma non pubblicato. Lo scritto di Newton sull'ottante rimase nascosto negli archivi di Edmond Halley, che ereditò i documenti di Newton [7], e fu reso pubblico solo dopo la morte di Halley stesso. In effetti, il primo ottante fu costruito, indipendentemente da John Hadley, in Inghilterra nel 1731 e da Thomas Godfrey in America nel 1730 [8, 9]. Gli ottanti consentivano la misurazione degli angoli tra due oggetti arbitrari, non solo tra un oggetto e l'orizzonte. L'ottante si sviluppò ulteriormente nel sestante nel 1757, quando divenne necessaria la misurazione di angoli maggiori dei 90° che erano il limite dell'ottante. Nuovi metodi di navigazione richiedevano infatti la misura dell'angolo tra la Luna e il Sole che, se misurato con sufficiente precisione, avrebbe permesso di ricavare l'ora relativa a Greenwich, o a qualsiasi altro luogo in cui fossero prodotte tabelle di distanza angolare e tempo, per regolare i cronometri nautici di bordo. Cronometri nautici che furono finalmente

¹ Università di Firenze, stefano.selleri@unifi.it.



Figura 1: La nave faro *East Goodwin* in una foto molto più tarda, probabilmente 1937.

disponibili nel 1759 [10] e che consentivano di determinare la longitudine della nave rispetto a un meridiano di riferimento valutando la differenza tra l'ora locale in mare e l'ora locale al meridiano di riferimento stesso [11].

Questi elementi, insieme ai fari sulla terraferma, costruiti a partire dal II secolo a.C. (Alessandria) e dai Romani in tutta Europa durante il periodo romano, rimasero i fondamenti della navigazione fino alla fine del XIX secolo. I progressi nei fari, originariamente falò, furono l'invenzione della lampada di Argand (1782), una lampada a olio brillante e senza fumo, delle lampade a gas ed elettriche, degli specchi catottrici (1777) e delle lenti di Fresnel (1832) [12].

Tuttavia, la dimostrazione dell'esistenza onde elettromagnetiche (1888) [13] e l'invenzione della radio intorno al 1895 da parte di molti ricercatori [14], ma pienamente sviluppata e sfruttata da Guglielmo Marconi [10], aprirono una nuova era. Inoltre, la dimostrazione che le onde radio potevano propagarsi ben oltre l'orizzonte (1901) [16], mentre la luce dei fari era limitata sia dall'orizzonte che dalla nebbia, spinse i ricercatori a sviluppare quella che sarebbe diventata la *radionavigazione*.

Questo contributo tratteggia alcuni dei primi sviluppi più significativi in larga parte dovuti proprio a Guglielmo Marconi nel campo della navigazione assistita dalle onde radio, fino alla svolta rappresentata dai sistemi satellitari artificiali.

1. Le prime applicazioni della radio alla navigazione

Guglielmo Marconi è stato attratto dal mare fin da bambino. Molti esperimenti furono condotti a bordo di una nave nel golfo di La Spezia [17], e uno dei primissimi collegamenti radio permanenti fu tra Dover e la nave faro *East Goodwin* (1896, Fig. 1). Infatti, il primo segnale di soccorso trasmesso via radio proveniva proprio dalla *East Goodwin* quando la nave *Elbe* si arenò nelle sue vicinanze nel 1899 [18].

I segnali di soccorso non furono standardizzati fino al 1904, quando la *Marconi Co.* definì le tre lettere "CQD" come segnale di soccorso standard [19]. Una successiva conferenza a Berlino, nel 1906, introdusse il noto codice "SOS" [20], che divenne gradualmente

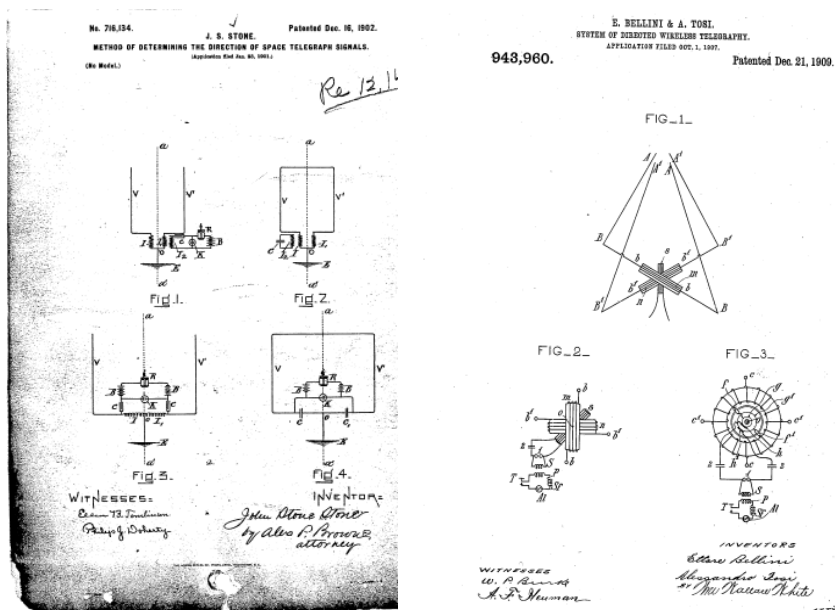


Figura 2: A sinistra: brevetto di John Stone Stone del 1902 [22]; a destra: brevetto Bellini-Tosi del 1909 [25].

lo standard.

Sebbene i segnali di soccorso fossero ovviamente fondamentali per salvare vite umane in mare, basti ricordare la collisione Republic-Florida (23 gennaio 1909), il naufragio del Titanic (15/04/1912 - dove “CQD” e “SOS” furono usati alternativamente) e il siluramento del Lusitania (07/05/1915), questi non furono di alcun reale aiuto alla navigazione.

La prima vera applicazione alla navigazione fu la sincronizzazione degli orologi, come già accennato nell’introduzione, il conoscere esattamente l’ora, con precisione del secondo, al meridiano di riferimento e valutando l’ora locale col culmine del sole è possibile risalire alla longitudine. Avendo capito che basse frequenze e antenne alte potevano collegare punti molto distanti fin dal successo del collegamento transatlantico di Marconi nel 1901, i francesi utilizzarono l’edificio più alto dell’epoca, la Torre Eiffel, per innalzare delle antenne filari a ventaglio rovesciato a partire dal 1905. L’evoluzione di questa stazione fu utilizzata, dal 1910, per inviare segnali orari alle navi in tutto il Nord Atlantico [21]. Ciò consentiva una sincronizzazione precisa e regolare dei cronometri nautici, molto più accurata di quella ottenuta con un sestante che misurava gli angoli relativi tra Luna e Sole, e quindi una navigazione più precisa.

La seconda applicazione è il radiogoniometro: un dispositivo per rilevare la direzione di arrivo di un’onda elettromagnetica. Ciò permetteva, misurando l’azimut di due o più radiofari, di localizzare la posizione della nave come si faceva con i fari e le bussole da rilevamento. Abbiamo brevetti molto antichi per radiogoniometri, di John Stone Stone (1902) [22] (Fig. 2 e Lee de Forest (1904) [23], purtroppo limitati nella precisione. Poco dopo, Alessandro Artom ideò un modo in cui due bobine fisse e una bobina mobile potevano essere utilizzate per determinare la direzione di arrivo di un’onda elettromagnetica con maggiore

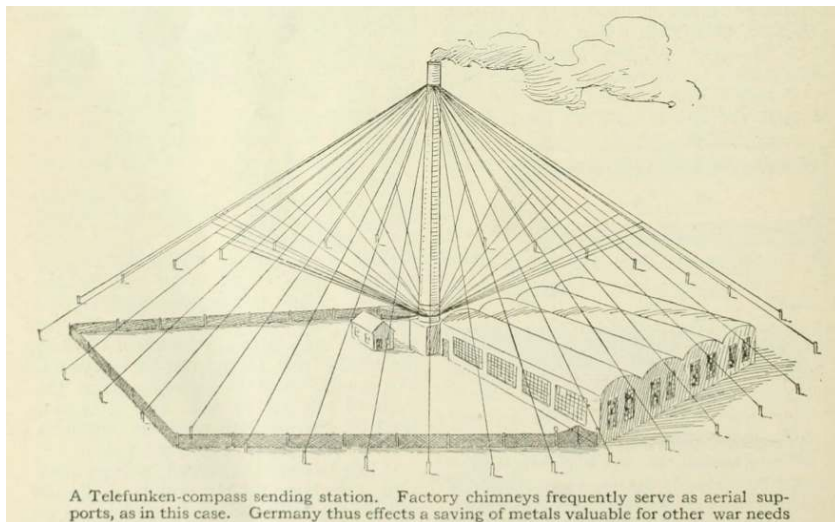


Figura 3: Il sistema *Telefunken Kompass Sender* [29].

precisione (1907) [24]. Questo è il cuore del radiogoniometro sviluppato successivamente da Ettore Bellini e Alessandro Tosi (Fig. 2), apparecchio che fu per lungo tempo il miglior strumento per rilevare la direzione di arrivo di un segnale [25, 26].

Negli Stati Uniti gli esperimenti con i radiofari iniziarono nel 1911 e, nel 1917, un radiofaro fu installato nel faro ottico di Navesink nel New Jersey, seguito da altri due nella baia di Chesapeake nel 1919. Gli esperimenti procedettero lentamente a causa della Prima Guerra Mondiale e, in effetti, l'antenna ricevente utilizzata a bordo era una semplice antenna a telaio, non il più accurato dispositivo Bellini-Tosi [27].

Marconi, da parte sua, installò un radiogoniometro Bellini-Tosi sul transatlantico *RMS Mauretania* e condusse esperimenti con successo, ma, a causa della mancanza di amplificazione, la portata era limitata a 15 miglia. Esperimenti analoghi sulla *USS Wyoming* fallirono a causa dell'interferenza dello scafo della nave [28].

Notiamo come, in questi esperimenti, i radiofari terrestri erano omnidirezionali, mentre l'antenna di bordo era direttiva e orientabile. L'evoluzione successiva invertirà questo paradigma.

2. Distanze maggiori

Un approccio diverso, sperimentato sia dalla *Marconi Co.* che dalla *Telefunken*, consisteva nel simulare più fedelmente un faro, ovvero proiettare un fascio direzionale rotante. In questo modo il ricevitore sulla nave (o sul dirigibile), non necessariamente altamente direttivo, poteva essere molto più semplice, persino omnidirezionale. Ciò era particolarmente utile anche in condizioni di mare agitato, quando il puntamento del radiogoniometro di bordo era influenzata dal rollio e dal beccheggio della nave.

Il *Telefunken Kompass Sender* (1907) era costituito da un'antenna a forma di ombrello composta da 32 dipoli indipendenti a V invertita, che condividevano la posizione

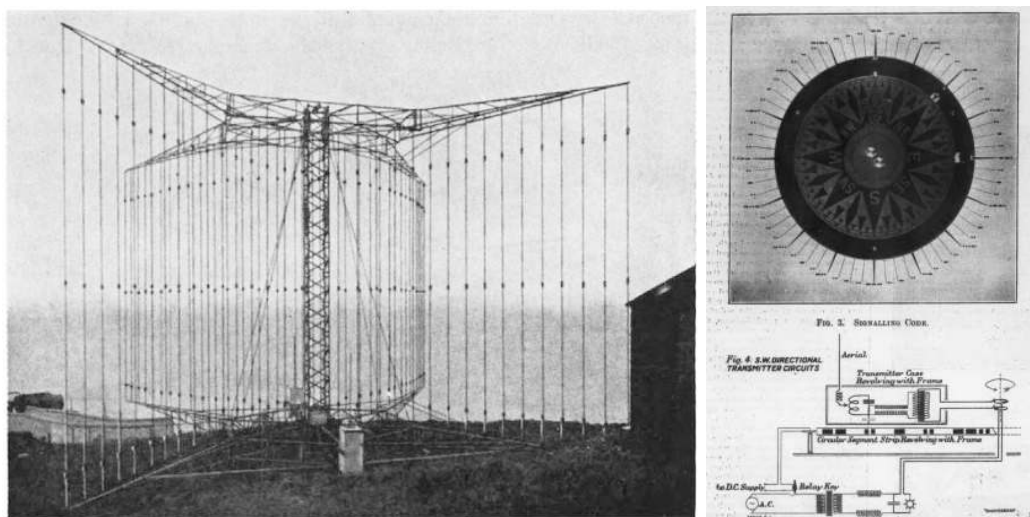


Figura 4: A sinistra: Il l'antenna a doppio riflettore parabolico contrapposto ideato da Marconi; a destra: il meccanismo alla base dell'antenna per trasmettere codici morse specifici per ogni settore. Impianto sperimentale di Marconi del 1922 sull'isola di Inchkeith [31].

del vertice e giacevano su piani verticali ruotati di 11.25° l'uno dall'altro (Fig. 3). A un dato istante, la stazione trasmetteva il proprio segnale di identificazione da tutti i dipoli in modo omnidirezionale, quindi ripeteva il segnale utilizzando un dipolo alla volta, in sequenza. Poiché il ritardo tra due trasmissioni successive era fisso, l'operatore sulla nave, o sul dirigibile, poteva capire quale dipolo puntasse nella sua direzione dal ritardo tra il segnale omnidirezionale e il momento in cui la potenza ricevuta era al massimo, calcolando da questo il suo azimut rispetto alla stazione [29, 30]. Poiché i dipoli erano debolmente direttivi, si scoprì ben presto che lavorare sul nullo in ricezione piuttosto che sul massimo portava ad accuratezze maggiori.

Marconi sperimentò i radiofari direttivi nel 1922 sull'isola di Inchkeith, nel Firth of Forth in Scozia. Il suo dispositivo comprendeva due riflettori cilindrici parabolici, uno dietro l'altro, ciascuno largo 13 m e alto 9 m (Fig. 4). Il sistema funzionava con lunghezze d'onda comprese tra 4.25 e 6.25 m a circa 500 W, utilizzando ancora un oscillatore a scintilla. Il periodo di rotazione era di 2 minuti e l'intero intervallo azimutale era suddiviso in 62 settori. Un ingegnoso sistema a dischi alla base del rotore permetteva di inviare un codice Morse specifico e diverso in ciascuno dei 62 settori (Fig. 4). Il ricevitore sulla nave, rilevando quale segnale Morse fosse il più forte, poteva quindi determinare l'azimut puntato dall'antenna e quindi la sua posizione relativa ad essa [31].

3. Precisioni maggiori

Sebbene i radiofari come quelli presentati nella sezione precedente fossero utili per determinare la posizione, non erano sufficienti per fornire una vera radionavigazione.

La vera radionavigazione guidata arrivò per la prima volta con i sistemi di atterraggio.

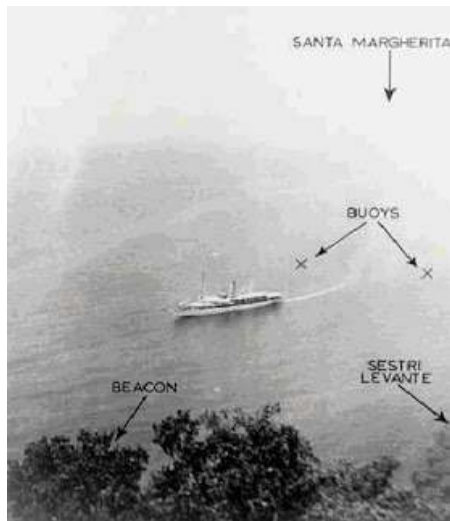
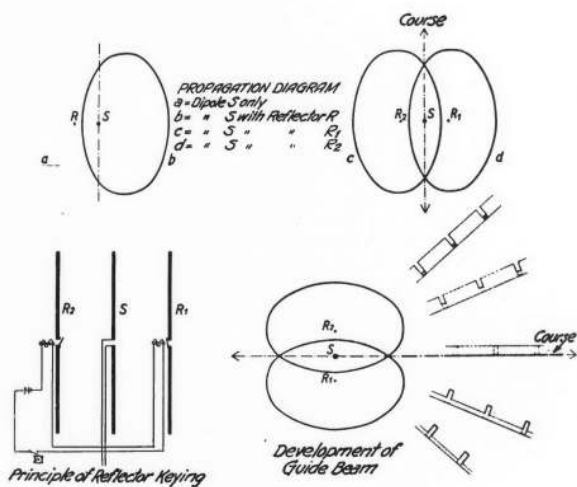


Figura 5: A sinistra:Principio di funzionamento del fascio di Lorenz o *Lorenz beam* [32]; a destra:foto dell'*Elettra* in navigazione strumentale (1934).

Ernst Kramar, che lavorava per *C. Lorenz-A. G.*, ideò un sistema ingegnoso per un radiofaro ad alta precisione per l'atterraggio (1932). Denominato *Ultrakurzwellen-Landfunkfeuer* e poi diffusosi in tutto il mondo come *Lorenz beam*, comprendeva tre dipoli verticali all'estremità della pista di atterraggio, quelli laterali con un'alimentazione leggermente ritardata di fase, in modo che, utilizzando quello centrale e solo uno dei due laterali, si ottenessero diagrammi di radiazione leggermente deviati a destra o a sinistra della pista. Veniva generata un'onda continua da 500 W a 33.3 MHz, ma un interruttore meccanico commutava tra le due possibili configurazioni a due dipoli, in modo che una coppia irradiasse per 1/8 del periodo e l'altra per 7/8 (Fig. 5). In questo modo, il pilota in atterraggio avrebbe udito un'onda continua se perfettamente allineato, mentre avrebbe iniziato a percepire impulsi brevi o lunghi sovrapposti se avesse deviato a destra o a sinistra e, grazie alla diversa lunghezza del segnale, avrebbe capito immediatamente come correggere la rotta [32]. Questo sistema, pienamente operativo nel 1934, sarà adottato per gli atterraggi aerei in tutta Europa dal 1939.

In quegli stessi anni Marconi realizzò alcuni esperimenti di grande impatto mediatico: una navigazione completamente "cieca", o meglio "strumentale", del suo yacht *Elettra* nel Golfo del Tigullio, sfruttando un radiofaro da 500 MHz e 50 W, con un concetto simile a quello del radiofaro di Lorenz, ma sfruttando due riflettori parabolici in opposizione di fase e una modulazione della portante con due toni di altezza diversa. Nella linea del radiofaro vi era dunque silenzio, mentre un suono udibile, dalla sua tonalità acuta o grave, indicava se la nave si trovava fuori rotta a sinistra o a destra. Marconi riuscì a navigare con precisione tra due boe distanti solo 90 o 100 metri, simulando l'ingresso di un porto [33, 34] (Fig. 5).

Vale poi la pena ricordare che il sistema Lorenz fu sviluppato, aumentandone la direttività e la gittata, durante la seconda guerra mondiale, fino a riuscire a guidare i bombardieri tedeschi fino alle città inglesi, di notte, con stazioni base prima sulla terraferma tedesca dal 1939 (Fig. 6) e poi sulla Francia, anche se con una non precisione insufficiente [35].



Figura 6: Sistema di guida dei bombardieri tedeschi all'inizio della Seconda Guerra Mondiale.

4. Dalla navigazione azimutale a quella iperbolica

Un radiofaro basato sul diagramma di radiazione raggiunge a malapena la precisione di 2° , il che porta a un rilevamento della posizione piuttosto impreciso lontano dal radiofaro stesso, come già sottolineato da Hinsley. Questo non è un problema se la portata del radiofaro è limitata a poche decine di miglia, ma alle centinaia di miglia l'errore sul punto nave diviene inaccettabile.

Gli inglesi, tra le altre contromisure della Seconda Guerra Mondiale, risposero ai tedeschi con il sistema *Gee*, basato su un concetto completamente diverso, quello della navigazione iperbolica.

Il sistema *Gee* si basava su una stazione centrale *master* e su tre stazioni *slave*. La stazione centrale emetteva segnali di sincronizzazione verso le stazioni *slave* che, a loro volta, irradiavano in modo sincrono. Valutando la differenza di tempo di arrivo sul piano di ciascuna coppia di segnali, si potevano ricavare tre iperboli e, alla loro intersezione, determinare la posizione del piano (Fig. 7).

Sviluppato nel 1940, il *Gee* funzionava a 30 MHz; si prevedeva che fosse efficace in un raggio di 100 miglia, ma dimostrò di poter coprire 300 miglia. Il *Gee* divenne pienamente operativo nel 1942, consentendo una precisione che andava da 150 metri sul territorio continentale del Regno Unito, all'interno del triangolo definito dalle tre stazioni *slave*, a 1.6 km su Francia e Germania [36].

La navigazione iperbolica fu anche la base per i successivi programmi sviluppati LORAN-A (1942 - precisione 2 – 3 km), LORAN-C (1957 precisione 250 – 450 m) e OMEGA (1971), quest'ultimo in grado di coprire, con un segnale a 10 – 14 kHz l'intero globo con sole 8 stazioni (più una di riserva) con una precisione di 2 km [37].

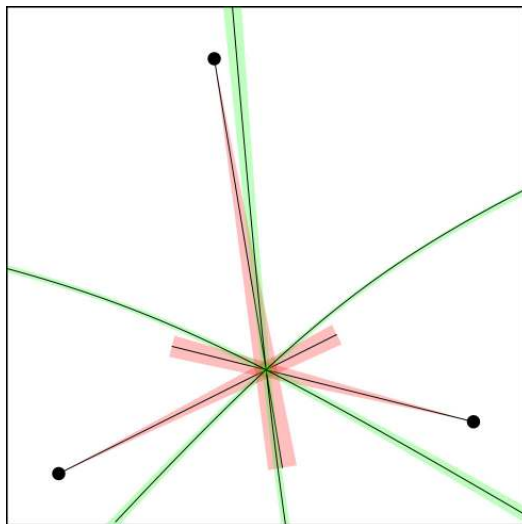


Figura 7: Confronto fra un punto nave azimutale e un punto nave iperbolico, entrambi con la relativa incertezza.

5. Conclusioni

La storia della radionavigazione è breve, lunga quanto quella della radio stessa, ma ricca di dispositivi interessanti e ingegnosi. L'evoluzione tecnologica ha però reso obsoleti *tutti* i sistemi descritti in precedenza, e anche quelli non descritti per motivi di spazio. Tutti sono stati soppiantati dai sistemi satellitari.

Il *Global Positioning System* (GPS), il cui primo satellite è stato messo in orbita nel 1978, operativo dal 1983 e completo, in prima generazione, nel 1985, ne è il primo esempio. Lanci di satelliti successivi lo hanno reso lo standard mondiale dal 1993 e, insieme alla cartografia completamente digitalizzata ha permesso l'informatizzazione della navigazione, legandola definitivamente alle onde radio di Guglielmo Marconi.

Sistemi simili e alternativi al GPS sono Russi *Global'naja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema* (GLONASS), iniziato nel 1982 e completata 2012; Cinesi *BeiDou Navigation Satellite System* (BDS), iniziato nel 2000 e completato nel 2020; ed Unione Europea con il programma Galileo, iniziato nel 2005 e non nancora completato, con l'ultimo lancio, ad oggi, nel 2024. Creati in un'ottica di non-dipendenza dagli Stati Uniti. Stati Uniti che contemporaneamente mantengono attivo il LORAN-C per garantire un backup in caso di guasto del GPS.

Bibliografia

- [1] C. Ptolemy “Μαθηματικὴ σύνταξις” or “Almagestum” A.D. 150 ca., see P. Lichtensein (ed.) for its latin version, Venice 1515.
- [2] Synesius of Cyrene “Συνεσιου Επισκοπου κυρηνησ” A.D. 400 ca. J.-P. Mingue (ed.) greek & latin version, in *Patrologiae Cursus Completus, Series Græca*, vol. 66, 1970 pp. 1578-1586.

- [3] L. Shu-hua, "Origine de la Boussole II. Aimant et Boussole," *Isis*, vol. 45, no. 2. 1954, pp. 175-196.
- [4] A. Neckam, *De nominibus utensilium*, manuscript, XII century.
- [5] voce: Neckam, Alexander, in *Encilopædia Britannica*, vol. 19, 1911, p. 336.
- [6] M. de Maravillas Aguiar Aguilar, "Los primeros instrumentos de navegación que viajaron a América, Un estudio del Quatri partitu o Espejo de navegantes (ca. 1528) de Alonso de Chaves," *Mélanges de la Casa de Velázquez*, vol. 49, 2019, pp. 223-244.
- [7] I. Newton "A true Copy of a Paper found, in the Hand Writing of Sir *Isaac Newton*, among the Papers of the late Dr. *Halley*, containing a Description of an Instrument for observing the Moon's distance from the Fixt Stars at Sea," *Philosophical Transactions of the Royal Society* vol. XLII, no. 465, pp. 155–156 and plate.
- [8] J. Hadley, "The Description of a new Instrument for taking Angles," *Philosophical Transactions of the Royal Society* vol. XXXVII, no. 420, 1731, pp. 147–157 and plates.
- [9] J.L.E. Dreyer, "On the invention of the Sextant," (in English) *Astronomische Nachrichten*, vol. 115, no. 3, 1886, pp. 33-34.
- [10] E. Whittle, *The Inventor of the Marine Chronometer: John Harrison of Foulby (1693-1776)*. Wakefield: Wakefield Historical Publications, 1984.
- [11] S. Moskowitz, "The World's first Sextants," *Navigation*, vol. 34, 1987, pp. 22-42.
- [12] W.H. Davenport Adams, *The Story of Our Lighthouses and Lightships*, London: Thomas Nelson & Sons, 1891.
- [13] H.R. Hertz, "Ueber electrodynamische Wellen im Luftraume und deren Reflexion, *Annalen der Physik und Chemie*, vol. XXXIV. 1888, pp. 609-623.
- [14] F.E. Gardiol, "About the beginnings of wireless," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 3, no. 4, 2011, pp. 391-398.
- [15] G. Falciasecca, "Marconi's early experiments in wireless telegraphy, 1895," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 52, no. 6, 2010, pp. 220-221.
- [16] G. Pelosi, S. Selleri, B. Valotti, "From Poldhu to the Italian station of Coltano: Marconi and the first years of transcontinental wireless," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 46, no. 3, 2004, pp. 47-54.
- [17] "Gli Esperimenti del Telegrafo Marconi," *Il Resto del Carlino*, July 15, 1897.
- [18] W.J. Baker, *History of the Marconi Company*. Oxon: Routledge, 1998, pp. 39–40.
- [19] "Circular 57," Marconi International Marine Communication Company, January 7, 1904.
- [20] *1906 International Wireless Telegraph Convention*, Government Printing Office, Washington D.C., 1907, p. 38.
- [21] T. Simpson, B. Liles, T.S. Bird, "The history of wireless telegraphy at the Eiffel tower," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 65, no. 2, 2023, pp. 130-135.
- [22] J.S. Stone, "Method of determining the direction of space-telegraph signals," U.S. patent 716134, Dec. 16, 1902.
- [23] L. de Forest, "Wireless signaling apparatus," U.S. patent 771819, Oct. 11, 1904.
- [24] A. Artom, "Sistema di dispositivo che permette di evitare la rotazione delle antenne in una stazione di telegrafia senza filo dirigibile e particolarmente di determinare la direzione di una stazione trasmittitrice," Italian patent 88766, Apr. 03, 1908.
- [25] E. Bellini, A. Tosi, "System of directed wireless telegraphy," U.S. patent 943960, Dec. 21, 1909.
- [26] P.C. Sandretto, "Alessandro Artom," in "Biographies of Pioneer Award Winner," *IRE*

Transactions on Aeronautical and navigational Electronics, vol. 4, 1957, pp. 45-47.

- [27] A.E. O'Brien, *History and Status of U.S. Marine Radiobeacon System*, Washington: Office of Navigation, 1983.
- [28] L. Howeth, *History of Communications-Electronics in the United States Navy*, Washington: Bureau of Ships and Office of naval History, 1963.
- [29] "How the Zepelin raiders are guided by radio signals," *Popular Science*, vol. 62, no. 4, pp. 632-634, 1918.
- [30] A. Bauer, "Some historical and technical aspects of radio navigation, in Germany, over the period 1907 to 1945", 26 December 2004.
- [31] N. Wells, "The Marconi wireless beam reflector on Inchkeith," *Engineering magazine*, vol. 119, no. 3089, Mar. 13, 1925, p. 309.
- [32] R. Elsner, E. Kramar, "Ultra-short wave radio landing beam - the C. Lorenz A.G. radio beacon guide beam system," *Electrical Communication*, vol. XV, no. 3, Jan. 1937, pp. 195-206.
- [33] "New Marconi triumph, ship steered by wireless, blind control," *Daily Mail*, July 31, 1934.
- [34] G.A. Isted, "Guglielmo Marconi and the history of radio. Part II," *GEC Review*, vol. 7, no. 2, 1991, pp. 110-122.
- [35] F. H. Hinsley, *British Intelligence in the Second World War* , Vol. I, Cambridge: University Press, 1979.
- [36] W.F. Blanchard, "Air navigation systems Chapter 4. Hyperbolic airborne radio navigation aids – A navigator's view of their history and development," *The Journal of Navigation*, vol. 44, no. 3, 2009, pp. 285-315.
- [37] G.P. Asche, "The Omega system of global navigation," *International Hydrographic Review*, vol. 50, no. 1, 1973, pp. 87-99.