

鉄道でのミリ波帯通信の利用

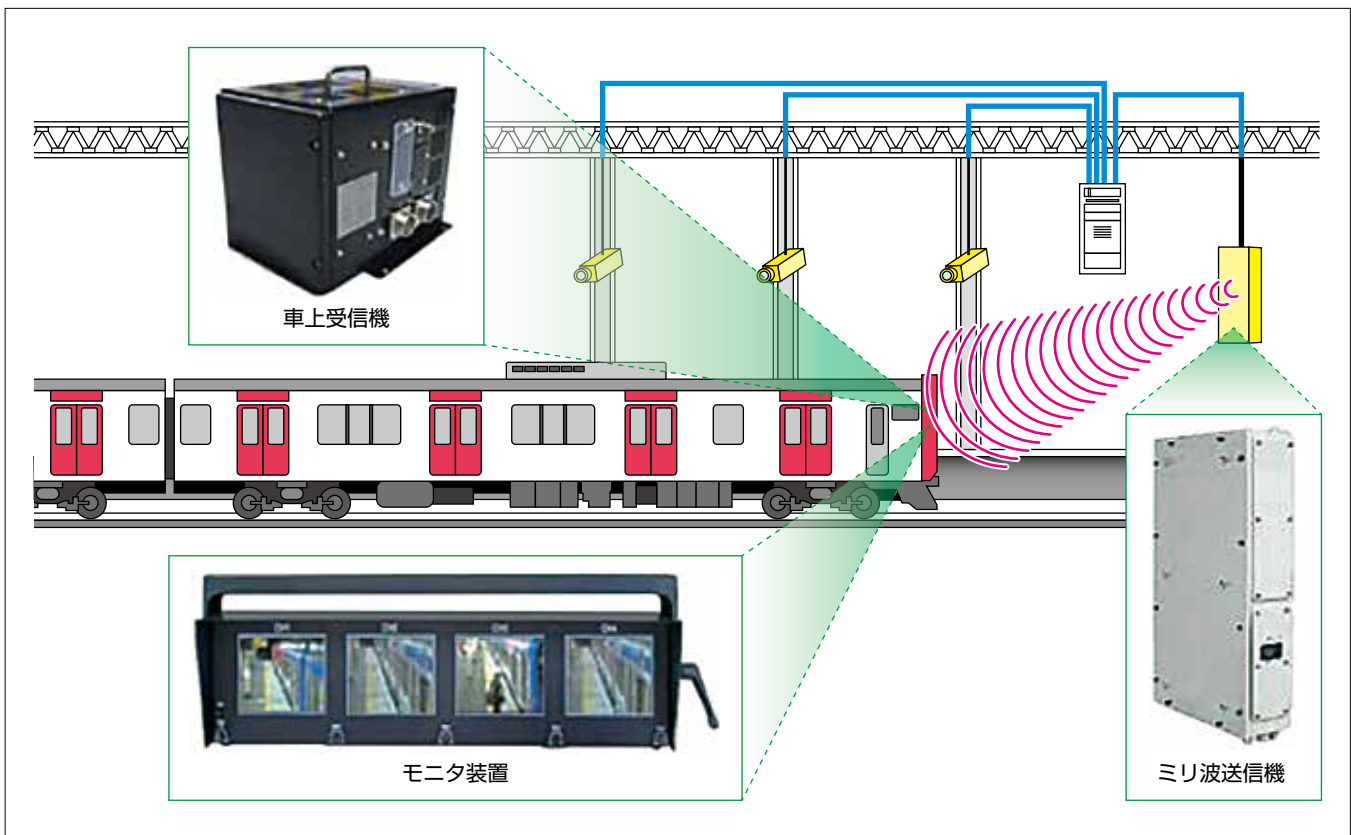
Use of Milli-Meter Wave Communication on the Railway System

要 旨

5G(第5世代移動通信システム)等に代表される通信技術の進歩に伴い、電波の需要も増大してきている。近年では、5G、無線LAN等の市井のユーザーが使用する携帯端末の規格でも、それぞれ28GHz、60GHz帯等の準ミリ波、ミリ波帯の周波数を使用するようになってきている。このような動きは、通信速度の向上を目指しての高効率な変調技術や情報データの圧縮技術とともに、純粋に広い通信帯域を用いての通信速度の向上を図ることを意味する。使える周波数帯はほぼ使い尽くされて、ミリ波は最後に残ったフロンティアとされてきた⁽¹⁾。

三菱電機は無線通信でのミリ波帯の重要性に早くから着目しており、2000年から鉄道会社向けのホーム監視画像伝送システムを市場展開し、今日まで多くの顧客に納入して安全な鉄道運行に貢献してきた。

今後も開拓が進められるであろうミリ波帯で、ホーム監視画像伝送システムを中心とした現在ミリ波を使用しているシステム及び今後のミリ波を使用した鉄道システム等をあらためて認識することによって、社会に貢献できる様々な製品への適用を進めていく。



ミリ波を用いたホーム監視画像伝送システムのイメージ

駅に設置されたミリ波送信機から電車に搭載している車上受信機へ、ホームの乗降監視カメラの映像を瞬時に伝送する。運転士は運転席からモニタ装置を通してリアルタイムに乗降監視が可能で、安全なワンマン運転に貢献する。

1. ま え が き

ミリ波帯とは、電波行政的には30~300GHzの周波数帯を指す。図1に総務省の周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴を示す⁽¹⁾。

一般的に、補助単位のミリ(mm)、マイクロ(μ)はそれぞれ1/1,000, 1/1,000,000を意味して、“マイクロ”の方が“ミリ”より小さいことを示すが、図1のとおり、波長の長い方が“マイクロ波”と呼ばれ、マイクロ波より波長が短いにもかかわらず“ミリ波”と呼ばれている奇妙さがある。ミリ波帯の電波が持つ特徴としては次の四つが挙げられる。

- (1) 大容量通信
- (2) 距離減衰が大きい
- (3) 電波の直進性
- (4) 小型化特性

本稿では、まずこれらミリ波帯の電波の特徴について述べた後、ホーム監視画像伝送システムを中心とした現在ミリ波を使用しているシステム及び今後のミリ波を使用した鉄道システム等について述べる。

2. ミリ波の特徴

この章では、1章で挙げたミリ波帯の電波が持つ四つの特徴についてそれぞれ述べる。

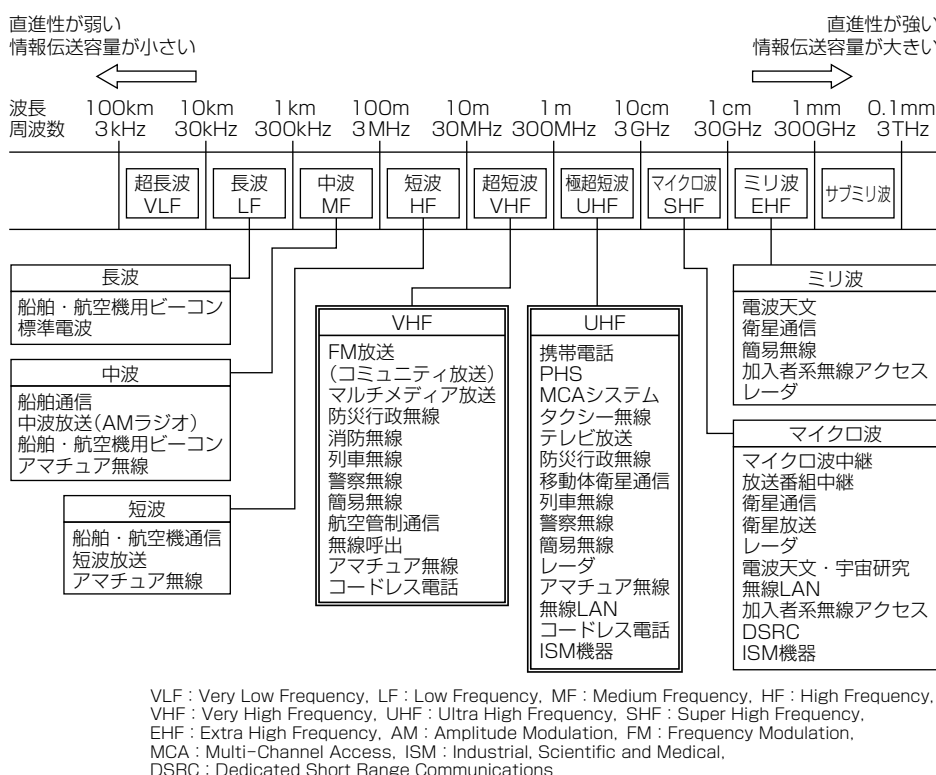


図1. 周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴⁽¹⁾

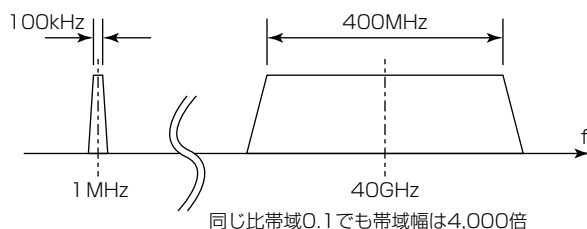


図2. 比帯域

(1) 大容量通信

通信容量を表すシャノンの式を次に示す。

$$C = B \cdot \log_2 (1 + SN) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、C : 通信容量(bps)

B : 帯域幅(Hz)

SN : 信号対雑音電力比(真数)

式(1)はSNを一定と考えれば、通信容量Cは帯域幅Bに比例して周波数帯域幅が広いほど扱える通信容量は大きくなることを意味する。また、フィルタなどの部品技術の設計では帯域幅を中心周波数で正規化した値である“比帯域”を用いた設計になる。例えば比帯域0.1では、中心周波数が1MHzの場合、100kHzの帯域幅しかないが、ミリ波で40GHzが中心周波数であれば同じ比帯域0.1では400MHzの帯域を持つことになる(図2)。帯域幅と通信容量が比例関係にあることを考えれば、ミリ波帯等の高い周波数帯の通信が大容量通信に適した帯域であることが分かる。

(2) 距離減衰が大きい

自由空間での電波の伝搬損失(L)は、 $L = (4 \pi d / \lambda)^2$

で示される。ここで、dは送受信間の距離、λは電波の波長である。40GHzでのLを図3に示す。図3には無線LANでよく知られる2.4GHzの伝搬損失特性も併せて示している。

40GHzでは60mで約100dBの損失になる。これは、60mで 10^{-10} (=1/100億)になることを意味している。もちろん送受信間の通信を成立させるための設計(回線設計)では、送信電力及び送受信のアンテナ利得を適切に設定することが必要だが、2.4GHz帯無線LANに比べて300倍ほど減衰が大きい。2.4GHzと40GHzで同じ条件(送信電力、アンテナ利得、変調方式)で比較した場合、40GHzの電波は2.4GHzの電波と比べて1/300の距離しか飛ばないという見方ができ、他システムに与え

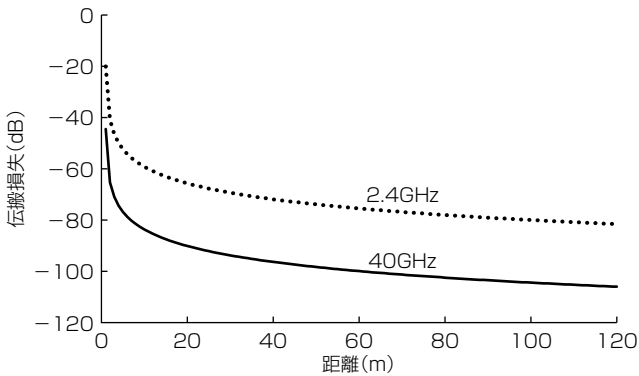


図3. 自由空間伝搬損失

る干渉(与干渉)が少ないとも言える。

(3) 電波の直進性

ミリ波は、1章で述べたとおり30~300GHz帯の電波であるが、ミリ波より更に高い周波数としてサブミリ波がある。サブミリ波は遠赤外線レベルの波長であり、電波と光の境界領域である。ミリ波は電波としては光に一番近いところに位置しており、その性質も光に近く、光の持つ直進性をミリ波も持っていると言える。また光同様に金属以外の物体に遮られる性質も持っている。この直進性及び遮蔽特性は、見通し通信以外は電波が届きにくく、先に述べた距離減衰と同様に他システムに与える干渉(与干渉)、他システムから受ける干渉(被干渉)を生じにくいことを意味する。

(4) 小型化特性

アンテナ等の電波の波長に依存する構造的電気部品が存在するが、周波数が高く波長の短いミリ波では、この構造的電気部品をより小さくできるメリットがある。ホーンアンテナの設計寸法を通じて、小型化の例を次に述べる。

図4に示すようなホーンアンテナのフレアの長さ l を一定として、開口径を変えたとき、利得が最大になる開口径にした場合のホーンアンテナを最適ホーンと呼ぶ。最適ホーンの利得は次式で表すことができる⁽²⁾。

$$G = 10 \log_{10}(ab/\lambda^2) + 8.08 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $a = \sqrt{3l_h\lambda}$ 、 $b = \sqrt{3l_e\lambda}$

λ : 波長

2.4GHzと40GHzで同じ利得のアンテナの寸法を比較すると、2.4GHz比で40GHzは約1/16の波長になるため、 a 、 b

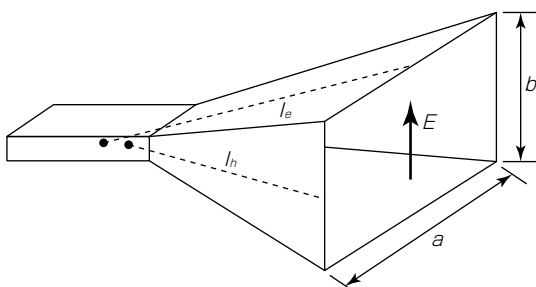


図4. ホーンアンテナ⁽²⁾

の各寸法値もそれぞれ約1/16と小型化されることになる。

このように、“大容量通信に適しているが、減衰が大きいため長距離通信には適さず、直進性が高い電波”，一言で言えばそのような特徴を持つミリ波であるが、干渉を抑制するためにあまり電波を遠方へ飛ばさず、公共インフラのように傍受行為に対してセキュリティ性の高い通信をしたい場合には大容量以外の用途にも好適であると言える。中でも43GHz帯の通信は免許波であり、法的な面からの干渉低減も十分効果が高い。

3. 鉄道分野でのミリ波通信システム

この章では、ミリ波帯を用いた通信システムとして、ホーム監視画像伝送システム、検修ミリ波伝送装置について述べる。

3.1 ホーム監視画像伝送システム

要旨に述べたとおり、ホーム監視画像伝送システムで当社は20年以上の歴史を持つ。このシステムでミリ波によって伝送する情報は、電車運転士が電車のドアの開閉操作を行う際に確認するドア付近の乗降確認の映像である。システム概要を図5に示す。

最も簡易な構成としては、駅ホームのカメラの画像をミリ波送信機でミリ波帯の変調波として送信し、電車側の運転台上に設置したミリ波車上装置で受信・復調した信号をモニタ装置に映し出して、運転士がその画像を確認するというものである。

システムとしては非常にシンプルであるが、そのシンプルさがこのシステムの特徴でもある。

ミリ波電波は直進性が高いことを2章で述べたが、ホーム監視画像伝送システムではこの物理特性を積極的にシステムに取り込んでいる。

画像情報の伝送は、駅ホームに設置されたミリ波送信機から、ホームへ入った車両に対して行われるが、アナログ

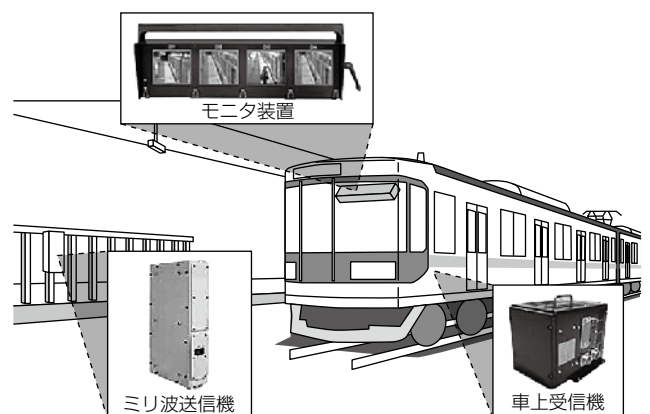


図5. ホーム監視画像伝送システム

方式のホーム監視画像伝送システムでは、ミリ波電波が届く送受信間に遮蔽物のないエリアに電車が進入することで自動的に画像の結実までの処理(復調)が行われるという、電波の有無で通信の確立がなされるアナログ通信の良い面を利用している。

また、ミリ波電波は限られたエリアにしか飛ばず、直進性を持っていることから駅の上下ホームで同じ周波数を用いても相互の影響が小さく、周波数の有効利用も図ることができている。

無線LANのようなネットワーク接続型システムと比較するために、図6にOSI(Open Systems Interconnection)参照モデルを示す。

アナログ通信をOSI参照モデルに当てはめるのは少々強引だが、装置のシンプルさ、情報伝達までの処理の少なさ(遅延の少なさ)が見て取れて、無線区間の遅延はμs(マイクロ秒)のスケールである。また、現在のホーム監視画像伝送システムと同様の動作をネットワーク型システムを用いて実現するような場合、システムとしての遅延のほか、画像をデータ化する必要があるため、通信の遅延以外にエンコード/デコード処理(いわゆるコーデック)で遅延時間を生じるといった問題もある。5Gでは無線区間での遅延性能は1msとなっているが、データの加工に必要な時間は含まれていないことに注意が必要である。

ホーム監視画像伝送システムで、当社が目指すところは次の3点である。

(1) 運行の安全性

信号の低遅延をポリシーとして、乗降客の安全に加えてユーザーである運転士も精神的安全性を持てるシステムである。

(2) 運行の継続性

装置品質を維持・確保する。

(3) 装置供給の継続性(保守性)

互換を持った装置を供給可能にする製造継続性を維持する設計である。

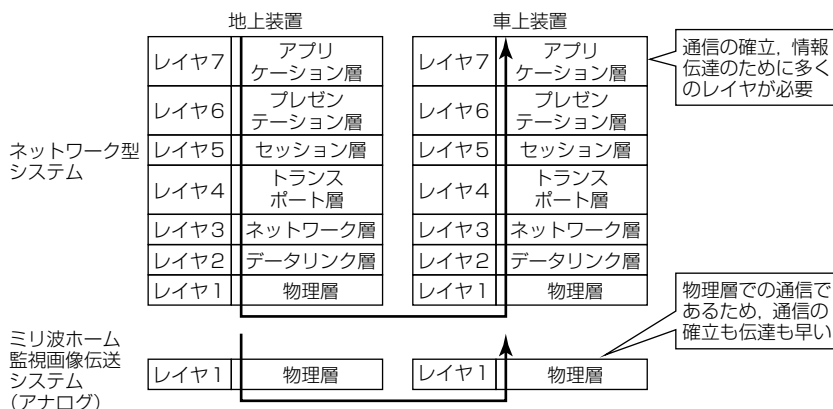


図6. OSI参照モデル

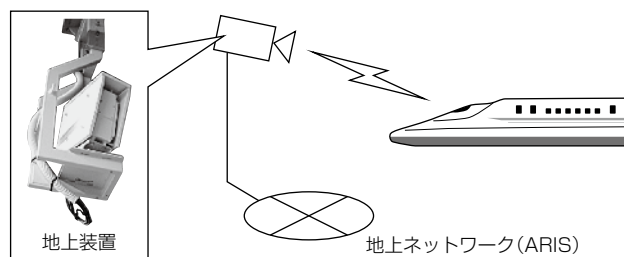


図7. 検修ミリ波伝送装置

3.2 検修ミリ波伝送装置

東海道新幹線では、車両搭載機器の動作記録データを走行中に蓄積し、車両基地や一部駅で地上システム(新幹線車両検修管理システム(ARIS))に送信することで、取得した車両データを分析し劣化状態や故障の進行に応じた予知保全を行っている。このデータの地車間通信で使用されているのが検修ミリ波伝送装置である。図7に装置及びシステムイメージを示す。検修ミリ波伝送装置では、駅到着から出発までの時間内に規定量の検修蓄積データを通信できる能力を持ち、より安全で安定した新幹線運行につなげている。

4. むすび

ミリ波帯の電波が持つ特徴を挙げて、鉄道システムでのシステム事例について述べた。鉄道でのミリ波帯電波との親和性(相性)は、大容量通信が必要とされてきたという理由ももちろんあるが、鉄道での列車の動きが直線的であるため、ミリ波電波としての直進性と見合っていることも関係していると考えられる。5Gやプライベート5Gなどのキャリア系通信による大容量通信が行われてきている現在、それら通信で用いられている高速通信技術を活用・発展させることによって、ミリ波帯は更なる発展を遂げる可能性があり、今後もフロンティアとして存在していくものと考えられる。当社としては、ホーム監視画像伝送システムのようなミリ波の電波の特徴を上手に活用するアプローチの製品なども含めて、公共機関を利用する乗客だけでなく、運転士などのユーザーにも安心して利用してもらえる通信システムの開発・供給を続けていく。

参考文献

- (1) 総務省：電波利用ホームページ | 周波数割当て | 周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴 <https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/>
- (2) 一般社団法人 電子情報通信学会：知識の森 4群(通信工学) - 2編(アンテナ・伝搬) 6章 開口面アンテナ https://www.ieice-hbkb.org/files/ad_base/view_pdf.html?p=files/04/04gun_02hen_06.pdf