産業応用における移動体通信

特集解説

正員 中川正雄 (慶應義塾大学理工学部)

1. はじめに

今日の世界はエネルギー、物質、そして情報で成り立っている。この中で情報はエネルギーと物質を制御するものであり、この伝達の高効率化と多様化は情報社会にとって必要不可欠である。

ところで、情報を送りそして受けるものとは、どんなものなのか？ 人間であるとの答がすぐに跳ね返ってくる。では人間だけか？ 以前はそのとおりであり、人間のみに限定されていた。ところが、近年になり、コンピュータ、ロボットなどの人間の創造物も情報を送り、そして受けるようになってきた。コンピュータどうし、ロボットどうしで通信し、更に人間たちとも通信をするのである。この傾向は今後ますます増える方向にあり、決して減ることはない。一人の人間がいれば数十台のコンピュータやロボットがあり、それらに必ず通信機能が付き、にぎやかに情報の交換がなされるのである。

以上の見通しは産業応用の分野でも例外ではない。むしろ、この影響を最も早く受けることが考えられる。そこで使われるコンピュータもロボットも移動機能を備えることが多くなり、移動体通信の必要性がでてくる。またこうした通信は従来の通信システムと異なり、ユーザが自ら通信網を所有し管理する“コンシューマ通信”⁽¹⁾の一部となり、将来大いに発展する可能性を秘めている。

本解説は産業応用における移動体通信に関するものであり、移動体通信の問題点である伝送路、更に法的側面を中心に解説を進める。また、こうした移動体通信の提案例にも言及する。

2. 移動体通信と伝送路

図1は、一般の通信システムを構成線図で示したものである。送信側は情報データ、符号器、変調器、電力増幅器、伝送路と送信機を結ぶインタフェースからなり、伝送路を経て中継器を経て更に伝送路を通り、受信側のインタフェース、復調器、復号器に至る。

もし仮にこの系が有線通信系であれば、以上のシステムの中で、伝送路をできるだけ良いものにすることをまず推薦したい。同軸ケーブルであれば損失の少ないものを、更に同軸よりは光ケーブルを推薦したい。

では、移動体通信ではどうだろうか。この場合の伝送路は人間がコントロールし得ない空間であり、これを勝手に取替えたりはできない。空間は種々の雑音や干渉、妨害、フェージング、第三者の盗聴などを含むことになり、これらをすぐには取除けない。こうなると、伝送路以外に着目することになるが、電力を増大するのは法的規制もあり困難であるので、符号の仕方、変調方法、インタフェースであるアンテナを工夫することになる。この中でアンテナは利得の高い優れたものほど容積的に大きくなる傾向があり、小形軽量の方向に反してしまう。ところが、半導体の発達によって符号と変調のコストは下がる一方であり、今後の移動体通信はこうした方向に大きく進歩するにちがいない。特に後述するスペクトル拡散変調方式は従来は高価とされ、産業応用の移動体通信にあまり向かないと思われてきたが、近年では伝送路の諸問題を解決するものとして有望視されている一つである。

図2は興味深い産業応用の移動体通信の例である無人ヘリコプタである。ヘリコプタを使った農薬の散布や、種々の作業は従来から人間が操縦する方式で行われている。ところが、低空における飛行が多く、このために、事故の危険性を常に多く含んでいる。また、人件費や使用料、燃料費もかなりの高額であり、騒音公害も問題になる。こうした中で考案されたのがリモートコントロールによる無人ヘリコプターである。無

Mobile Communications in Industries. By Masao Nakagawa, Member (Faculty of Science and Technology, Keio University).

キーワード：移動体通信、コンシューマ通信、スペクトル拡散通信、データキャリア、微弱無線設備、小電力無線設備、ロボット間通信

図 1 通信システム

図 2 リモートコントロールヘリコプタ

図 3 複雑な伝送路

人のヘリコプタであれば、事故のときも人命への被害は少なく、人件費も低く、ヘリコプタを小形にできるので燃費も少なく、低空飛行による効率の良い農薬散布ができ、騒音の被害も低い。

機械的な問題点としては、制御性や操縦性であるが、これもジャイロ技術を応用して安定な操縦の基礎が確保され、それに無線通信装置が付き、ヘリコプタの位置や速度の操作がなされている。

以上の例の無線通信はスペクトル拡散方式を用いていないが、その問題点の多くは操縦者とヘリコプタを結ぶ伝送路（この場合は空間）にある。例えば、フェージングのために情報にエラーが起こったり、故意の妨害を受けたりなどである。

2.1 伝送路の問題点

以上の無線操縦は産業応用の中の移動体通信の一例であり、他の移動体通信としては、工場内の無人搬送車や移動ロボットのリモートコントロール、機械や物体または人までも識別する装置（データキャリア）、レストランで客の注文をとる装置（オーダーリングシステム）、ポータブルなノート形パソコンとプリンタ間の通信などと、あげていけばきりが無い。以上の例以外にも多くの例があり、更に将来は思いもつかない優れた利用法が数多く提案されるであろう。

さて、無線通信の伝送路は有線の伝送路と異なり、空間という人間が制御しにくいものである。その問題点を列記する。

（1）自分たちだけのために独占できる伝送路では

なく、それゆえに雑音、干渉、妨害、盗聴といった通信の信頼性を低下させる問題が生ずる。

（2）送信と受信が十分に近距離ならよいが、少し離れると信号は減衰し、幾つかの伝搬路が図3のように生じ、それぞれが干渉し信号を弱める場合がある。その状態は移動体が移動するたびに変化し、信号の振幅や位相の変動を引き起こし通信の品質を低下させる。

（3）公共的な伝送路であるために、使用周波数、送信出力、変調形式などの法的規制を強く受ける場合が多い。これに関しては第3章で述べる。

2.2 伝送路の実測例

図2のような周囲が開けた野外の伝送路もあれば、産業応用で用いられる伝送路はむしろビルの中や工場の中のように、天井が空間の上部を遮り、壁やロッカーが側部を遮る伝送路を用いる場合が多い。そのために伝送路は図3のように複雑な経路をもつものになる。ここでは、京都大学吉田研究室の伝送実験の結果を参考にする⁽²⁾。

表1は実験諸元であり、図4は測定場所を示している。大学の研究室であり、一般のオフィスにも見られるようなごく一般的な部屋である。部屋のほぼ真中に T で示された送信機があり、1.2 m の高さの鉄製ロッカー上にある。 R は測定台上の受信機であり、移動しながら信号強度、デジタルデータの誤り率などを求める。

図5は変調に BPSK-RZ を用いた場合の誤り率特性であり、測定台上のパーソナルコンピュータを動か

表 1 実験諸元

周波数	442.5 MHz
ビットレート	1,024 kbps
送信電力	-25 dBm ~ -45 dBm (適宜変更)
送信信号	BPSK-RZ, BPSK
送信アンテナ	$\lambda/4$ モノポールアンテナ
受信アンテナ	グランドプレーンアンテナ

図 4 測定場所

図 5 BPSK-RZ スタティック特性

した場合とそうでない場合を示している。パーソナルコンピュータのようなコンピュータ機器はかなりの雑音源であり、送信出力が低いこの実験ではかなりの影響があり、要注意である。微弱無線によるコードレス電話ではこの種の雑音のために通信に支障がある場合も多いと聞いている。

図 6 は A コースを受信機が移動した場合の誤り率 (ステップ状) と受信強度 (なめらかな曲線) 特性であり、場所によっては 10^{-1} 以上の大きな誤りを生じている。これは図 3 のように複数の電波経路が互いに干渉するためである。図 6 では約 1.5 m ごとに特性が悪化する地点がでてくる。また悪化している場所の幅は 30 cm から 60 cm ぐらいである。これは送信周波数を変化させると変わるものである。周波数を、この場合では 442.5 MHz よりも高くすれば悪化する地点は更に頻繁に出現するが、その幅も狭くなる。また障害物による減衰も大きくなる。悪化する範囲の幅が狭くなるということは、受信機についたアンテナをほんの少し移動させれば良好な状態に回復し得るわけであり、この原理を使って、空間的に離れた二つ以上のアンテナを用いて受信特性の改善を図る空間ダイバシティが知られている。442.5 MHz では 40 cm 程度離れた複数のアンテナを用い、その倍の 885 MHz では波長が $1/2$ に減ったために 20 cm 程度離れたアンテナを用いる。

図 7 は場所を固定し送信周波数を動かした場合の電界強度相対値の概念図である。幾つかの周波数で信号が大きく減衰していることがわかる。このことから、

図 7 伝送路の周波数特性

図 6 A コース上での誤り率と受信電力

周波数を変えれば伝搬特性も変わることを利用した周波数ダイバシティも知られている。

3. 法的側面⁽³⁾⁽⁴⁾

無線通信の問題点として第2章(3)項で法的規制をあげた。ここではこの問題について簡単に触れておく。

移動体通信を実行しようとする場合、まず必要な情報伝送速度(ビットレート)を決め、更に送信周波数を決めていく。ビットレートは送りたい情報に依存し、すなわち、テレメタリングデータは極めて少ないレートでよく、画像情報のそれは大きく、音声はその中間という具合に決まってくる。送信周波数の決定は必要な伝送速度を送れる周波数であれば、技術的要因で決まるアンテナの大きさ、装置の作りやすさ、空間の伝搬特性、そして技術以外の法的規制で決まる。

電波法上で産業用移動体通信に主に使われている無線通信とは次のとおりである。

(1) 微弱無線設備 何の免許も必要なく、変調方式や周波数の指定も受けない無線設備である。ただし、図8に示すいわゆる3m法と呼ばれる厳しい電界強度の制限がある。この制限は322 MHzから10 GHzに特に厳しい。この周波数帯を使う重要な通信、例えば自動車電話、衛星通信などを守るためである。322 MHz以下で微弱無線を運用すると、一般のFM変調で約10 m程度の通信距離を確保できるとされ、コードレス電話の一部は微弱無線を利用している。

周波数の制限や変調形式の指定がない微弱無線のメリットは大きいですが、通信可能な距離を引き延ばす研究が盛んである。もちろん微弱無線の定義にのっとってのことであるが、スペクトル拡散通信方式の利用が有力である。微弱無線の電界強度の制限は測定器の基準帯域内での制限であり、いわばスペクトル密度的であり、帯域拡散されたスペクトル拡散信号には、トータルな電力を大きくできるために好都合であるとされている。スペクトル拡散通信方式については第4章で述べる。

(2) 小電力無線設備 一般に小電力無線設備は

図8 微弱無線設備の許容値

簡単な手続きながら、免許が必要である。しかしながら、中には使用者が免許を取得する必要のないものもある。それは、空中線電力が10 mW以下であり、郵政大臣が与えた呼び出し符号を自動的に送受信でき、技術基準適合証明を受けたものである。これは製造者が受けるものであるが、使用者には関係しない。例としてはコードレス電話がある。この無線設備の通信範囲は約100 mといわれ、微弱よりも広範囲であるが、前述の呼び出し符号や、変調形式、伝送速度などに種々の制約がある。また使用周波数帯も限定される。

(3) 特定小電力無線設備 これも上述のような免許を必要としない無線設備であるが、公衆回線との接続を前提としない自営通信を中心としたシステムである。ワイヤレスマイクロホン、連絡用通信システム、テレメータ、テレコントロール、構内ページングシステム、データ通信、医療用無線通信などが含まれ、それぞれ用途別に周波数帯が決まっている。

産業用移動体通信に用いられる電波法上の無線設備について述べた。(1)は極めて自由な使いかたができるが、通信できる距離に問題がある。そのために通信方式的な工夫が研究されている。一方、(2)と(3)は距離に関しては多少優れているが、使える周波数帯域やチャンネル数、更に変調方式などに制約があり、同一地域で多くの移動局が通信をしようすると、チャンネルの不足が問題となる。

4. スペクトル拡散通信^{(5)~(7)}

第3章における微弱無線の項で述べたが、最近スペクトル拡散通信方式が注目されてきている。この方式は情報伝送に必要な周波数帯域以上に送信信号の帯域を拡散用の周期的符号を利用して拡散し伝送するものであり、このために耐干渉特性、耐マルチパス特性、秘匿特性(信号の存在が第三者からわからない)、秘話性、符号分割多元ランダム接続(各送信信号に異なった拡散符号を割り当てて、その違いを利用して同一周波数帯域、同一時間帯でも自由に複数の通信ができること)、測距能力に優れた方式である。

以上の特性の中で耐干渉性、秘匿秘話性、測距特性があるために、この方式は現在広く軍用通信に用いられている。軍用通信ではジャミング妨害、盗聴は常識であるからである。

現在、この方式が民間の通信方式として検討されているのは、軍用で用いられている特性も含めて、第2章で述べた移動通信で必ず起るマルチパスの影響を排除する特性と、符号分割多元接続特性に注目しているか

らである。また微弱無線では第3章で述べた法的側面も見逃せない。また、将来ますます重要になるであろう利点は、通信機器が安価に出回るにつれての不注意による干渉や、意図的な妨害、更に盗聴といったものから情報を守るうえで、いずれにも強い特性をもつことである。

4.1 スペクトル拡散通信の原理

図9にはデジタル情報源から、拡散変調、伝送路を経て受信側の復調までのプロセスが描かれている。従来の通信方式と異なるのは拡散符号を用いた拡散変調と逆拡散復調である。送信側では元の狭帯域変調波のもつ周波数帯域よりも数十、数百から数千倍の拡散率でスペクトルが拡散される。受信側では送信側と同じ拡散符号を用いて元の狭帯域変調波を再現させ、デジタル情報を復調する。

図9 SS システム

図10 各部のスペクトル

図10は受信器入力のスเปクトル拡散信号（SS信号）のスぺクトルと狭帯域干渉波のスぺクトルと逆拡散された後に狭帯域復調器の入力に見られるスぺクトルである。逆拡散されたスぺクトルは希望信号と干渉信号の関係が逆転し、希望信号は狭帯域信号になり、狭帯域干渉信号は拡散される。拡散された干渉信号は容易に狭帯域復調器の前段の帯域フィルタで除去される。これは、拡散率が大きければ大きいほど効果があり、例えば、拡散率が数十dBであれば、受信機の入力ではマイナス数十dBの信号対干渉比でも情報が復調される。また、白色雑音に完全に埋もれた信号でも復調でき、この特性は第三者から信号の存在を悟れないという秘匿性にも利用される。また、スぺクトルの広がりは一種の危険分散効果をもち、マルチパスのために図7に示すような周波数特性をもつ伝送路でも安定な通信が可能になる。

5. 移動体通信の産業応用例

5.1 移動体識別⁽⁸⁾

工場や作業場で移動する物体を識別し、それらを選別したり、必要な加工を施したりするのが移動体識別である。移動体には電池をもたないデータキャリアが付けられ、固定されたリーダライタがデータキャリアに情報とデータキャリアの情報を送信するためのエネルギーを電磁誘導で与える。リーダライタから与えられたエネルギーで出力されるデータキャリア信号は極めて微弱であり、そのために伝送距離は短く、周囲の雑音の影響、特に2.2節で述べたコンピュータやプロセッサノイズの影響を強く受ける。こうした雑音は白色雑音というよりも、線スペクトルの集合体であり、第4章で述べたSS通信が適している。図11はSSを利用したシステムを示し、左の小さいものが移動体に付けられるデータキャリア、右の大きいものはリーダライタの増幅部である。

以上のシステムの仕様は表2に示される。

こうしたデータキャリアの応用は将来多岐にわたる

図11 データキャリア

表 2 データキャリアの仕様

拡散符号	M 系列 (63 チップ) Gold 符号 (63 チップ) マンチェスタ M 系列 (31×2 チップ) マンチェスタ Gold 系列 (31×2 チップ)
拡散変調	直接拡散変調(DS)
拡散帯域	2 MHz
伝送距離	0 mm~10 mm
サンプリング	8 ビット, 8 MHz

表 3 無人搬送車における通信方式の比較

項 目	通信方式	SS 通信	光空間 伝 送	無 線 (FM)	誘導無線	電磁結合
1. レイアウトの自由度		◎	○	◎	△	△
2. 床 布 線 工 事		不要	不要	不要	要	要
3. 多 局 間 通 信		○	×	○	○	○
4. 電 波 法 認 可		不要	不要	(不要)	要	不要
5. 耐 雑 音 性		◎	◎	○	○	○
6. 屋 外 使 用		○	△	○	○	△

文献(7)第9章「FA システムへの応用」, 中田, 吉田, 藪, 大泉著より

であろう。例えば、ポケットにしのばせたデータキャリアで部外者が否かを識別したり、家畜の首に吊るしたデータキャリアで家畜を識別したりである。更にロボット社会ではなくてはならないものになるであろう。SS 信号以外では FSK (周波数シフト変調) によるものが従来からあるが、SS の干渉排除機能と共に、SS の拡散符号自体が優れた識別用符号になっているために、SS の応用は将来有望である。

5.2 無人搬送車⁽⁷⁾

工場、倉庫の省力化にとって、無人搬送車は有力な道具である。無人搬送車が時々刻々必要とする情報は無線通信によって伝送され、また無人搬送車の情報が基地局に伝送される。工場や倉庫には、多数のコンピュータやプロセッサの雑音源があり、更にモータなどの雑音源もある。無人搬送車も一台のみならず多数あり、無人搬送車以外にも無線機や種々の電子機器がある。こうした環境で、SS 方式も提案されている。表3は文献(7)で示される各種の通信方式の比較である。誘導無線とあるのは搬送車が走る走行路と平行に設置された誘導線と搬送車のアンテナを電磁的に結合させるものである。また、ここでは FM も電波法認可不要とされているが、この資料が多少古く、現在の電波法では要としたほうがよい。

図 12 左官ロボット

5.3 左官ロボット

現在、日本全国で建築ラッシュが続いている。こうした中で問題なのは人手不足であり、また、熟練した技能をもった職人さんの不足である。この問題の一つの解決法として工事用のロボットが知られている。例としている左官ロボットは、ビル建設におけるコンクリート床の左官のためであり、生コンクリートを打設後に表面をならし、時間の経過と共にコンクリートの表面の状況を観察しながら、仕上げていくものである。一見すると簡単そうであるが、実は季節によって温度が異なり、夏は急いで仕上げるために、短時間に多くの労働力を必要とし、冬はゆっくりと仕上げ、そのために深夜にまでなるといように、その作業に熟練度を要求される。図12のような左官ロボットは左官作業を学習し、人間に代わって作業ができる。作業人との間の情報交換は無線伝送によっている。その出力は微弱電波法を適用した範囲内であり、いっさいの届出も免許も不要である。使用周波数は 223.14 MHz, 223.23 MHz, 223.30 MHz, 223.40 MHz の 4 チャンネルを切換えて使用し、その変調は FM 変調 (周波数偏位±5 kHz) である。

5.4 ロボット間通信⁽⁹⁾

前述の左官ロボット通信は、人間または固定の基地局とロボット間の通信の例である。更に、将来は複数の移動ロボットが工場や倉庫の中で走り回ることが考えられる。筑波大学油田研究室では複数のロボット間をトークンリンクで結び、変調は FSK 変調を用いている。複数のロボットの位置関係で通信の状態が大きく変わり、更に一台のロボットが通信可能な範囲から逸脱した場合の問題や共同作業の際の協調関係などの問題がある。一般にロボットの情報伝達スピードは人間の会話程度であり、ごく狭帯域の伝送でよいとされている。画像情報などもできるだけロボット内部で処

理し、外には圧縮された情報が伝送されるであろう。

6. む す び

本解説では、産業応用における移動体通信を伝送路、法的側面、そしてこれから有望と思われるスペクトル拡散方式を中心に述べてきた。以上の産業応用の通信は従来の通信と異なり、通信を必要とする人々が自家用的に管理運用する通信であり、コンシューマ通信と呼ばれる新しい通信の分野に含まれるものであり、今後大きく成長すると思われる。

常日ごろからスペクトル拡散通信などに関して御指導いただいている長岡技術科学大学 丸林元教授に感謝いたします。また、貴重な写真資料を多数提供（本文の図2；リモコンヘリコプタ，図11；データキャリア，図12；左官ロボット）していただいた東京計器の三浦正史部長に感謝いたします。

（平成2年6月27日受付）

文 献

- (1) 中川：「コンシューマ通信とスペクトル拡散技術」，電子情報通信学会スペクトル拡散技術とその応用研究会 SSTA 90-18（平2-6）
- (2) 谷川・吉田・竹内・中村：「ビル内における高速無線データ伝送特性」，第12回情報理論とその応用シンポジウム p. 187，（平元-12）
- (3) 猿渡：「微弱電波におけるスペクトル拡散通信方式の法的側

面」，電子情報通信学会スペクトル拡散通信研究会 SS 87-1（昭62-3）

- (4) 河野：「コンシューマ通信のための微弱電波利用システムの研究・開発動向」，電子情報通信学会スペクトル拡散とその応用研究会ワークショップ「コンシューマ通信」（平元-3）
- (5) 丸林・中川・河野：「スペクトル拡散の研究開発動向」，信学誌，72，585（平元-5）
- (6) 横山：「スペクトル拡散通信システム」（昭63）科学技術出版社
- (7) 中川監修：「スペクトラム拡散技術の基礎と応用」（昭62）トリケブス
- (8) 原田・梶原・武内・中川：「スペクトル拡散方式を用いた超小型データキャリアの特性について」，電子情報通信学会スペクトル拡散とその応用研究会 SSTA 89-43（平元-11）
- (9) プレムウッチィ・油田：「複数の自立型移動ロボットの協調のための無線ネットワークシステム——CAR Net——」，電子情報通信学会スペクトル拡散とその応用研究会ワークショップ「コンシューマ通信」 SSTA 89-2（平元-3）

中 川 正 雄（正員）

昭和49年慶應義塾大学大学院博士課程修了。工学博士。48年より同大学助手。以後、非線形振動，位相同期系，スペクトル拡散通信，コンシューマ通信，音声処理，光通信理論の研究に従事。現在，同大学理工学部教授。IEEE Consumer Electronics Society より Chester Sall Award 受賞（1990年6月）。