

工場内無線LANシステム

柴田伝幸，山田直之，浅野孔一

Local Area Radio Network in Factories

Tsutayuki Shibata, Naoyuki Yamada, Yoshikazu Asano

要 旨

工場内で移動するフォークリフトや無人搬送車とのリアルタイムなデータ伝送に対するニーズが増加している。無線LANシステムはこのニーズを満たすものとして注目されている。しかしながら、工場には電波の伝搬に障害となる工作機械などが多く配置されているため、無線LANシステムにとって劣悪な環境である。

本論文では、このような工場環境で良好な伝送特性を発揮できる無線LANシステム (Cellular Local Area Radio Network : CELARN) を提案している。CELARN

は複数の無線ネットワークと1つの有線ネットワークから構成されている。各無線ネットワークの無線基地局は有線ネットワークによってリング状に接続されている。また、無線基地局間のデータ伝送はデータフレームを循環させることにより行っており、データフレームを無線制御チャネルのトークンとして取り扱うことによりデータの衝突を防いでいる。自動車組立工場へ導入する場合の伝送性能を、工場内の電波環境を考慮して解析したところ、CELARNが良好な伝送遅延時間特性を有することを示している。

• •

Abstract

A need for real-time data transmission to forklifts and Autonomous Guided Vehicles (AGVs) in factories has been increasing. Local Area Radio Network (LARN) can fulfill this need. In factory environment, however, there are many machines which obstruct the radio wave propagation.

This paper proposes Cellular Local Area Radio Network (CELARN), which has good transmission performance in such factory environment. CELARN consists of some radio networks and a wired network

which integrates the radio networks. The base stations are connected to one another by the wired network in a logical ring. A data-frame makes the rounds of the base stations to transmit data. Moreover, the data-frame behaves as a token of the common radio control channel to prevent collisions. The transmission performance of the CELARN was analyzed for its application to car manufacturing factories. The analysis shows that the CELARN has good transmission delay performance even in such inferior environment.

キーワード

移動通信，LAN，小電力無線，伝送手順，伝送遅延時間，工場

1. まえがき

近年、工場や倉庫などの構内で移動するフォークリフトや無人搬送車 (Autonomous Guided Vehicle : AGV) とのリアルタイムなデータ伝送に対するニーズが増加している。電波を用いる無線LANシステムはこのニーズを満たすものとして注目されている。しかしながら、工場や倉庫には電波の伝搬に障害となる工作機械や部品棚などが多く配置されている。さらに、工作機械の中には強い電波雑音を発生する恐れのあるものも少なくない。これらのことから、工場内は無線LANシステムにとって劣悪な環境であるといえる。これまで無線LANシステムに関する研究が種々報告されているが¹⁻⁴⁾、実用環境の影響を考慮しているものは少ない。さらに、工場環境に適した無線LANシステムに関する報告はほとんど見られない。そこで、筆者らは工場環境で良好な伝送特性が得られる無線LANシステムの開発を目的として、とくに無線回線部分の伝送手順や有線回線と無線回線との間の接続手順について詳細に検討している。

本報告では、まず無線LANシステムを構築する上での課題を述べ、必要となる機能を明らかにする。次にその課題を解決するような無線LANシステムを提案する。そして提案したシステムを工場環境に導入した場合の伝送性能を評価する。

2. システム構築上の課題

本章では、工場内無線LANシステムにとって必要となる基本機能と、法規上の問題点を明らかにする。

2.1 無線LANシステムに必要な基本機能

ここでは、フォークリフトやAGVなどに取り付けられた移動端末 (MS) の間でデータ伝送を行う無線LANシステムを考える。その場合、MSがどこにいても常に通信が可能で、できる限り多くのMSが同時に通信できることが望ましい。前章で述べたように、工場内には電波の障害となるものが多数存在するため、常にMSどうしが直接通信できるとは限らない。そこで、通信エリア全体を小さいエリア (セル) に分割して、それらを管理する無線基地局 (BS) を複数配置し、それらを介してMS間の通信を行う方式の導入を考える。これは、いわゆるセル方式の移動通信ネットワークである。その基本的な構成は現在の自動車・携帯電

話システムに用いられている方式と同様である。セル方式の移動通信ネットワークでは、確実に通信できるようにするため、MSの位置管理が不可欠である。ここで、MSの位置管理とは、MSがどのセルに属しているかを知り、それをネットワークが記憶することをいう。なお、ネットワークが記憶しているMSの位置情報はユーザーにとっても有用であり、位置管理以外の目的にも利用できるものである。

従って、ここで提案する無線LANシステムはセル方式の移動通信ネットワークの形態を有し、次に示す2つの基本機能を実現できるものとする。

BSを介したMS - MS間のデータ伝送

MSの位置検出および登録などの位置管理

2.2 法規上の問題点

無線LANシステムのような構内無線通信に対する需要にこたえるため、日本では特定小電力無線と呼ばれる無線設備が規格化されている^{5, 6)}。従って、この規格に対応した無線LANシステムを開発することは法規的には可能である。しかしながら、この特定小電力無線局は比較的手軽に運用できる反面、その運用においては様々な制限が設けられている。それらのうち、特に次に示す制限は無線LANシステムの伝送特性に大きな影響を与えたと考えられる⁷⁾。

送信休止時間の設定

キャリアセンス回路の設置

そこで、これらの影響についてさらに検討する。

2.2.1 送信休止時間の設定

1つの無線設備による無線回線の占有を防ぐために、送信と送信の間に2秒以上の送信休止時間を確保することが義務づけられている。とくにBSでは、自己の管理するセル内の複数のMSからの送信に応答する必要がある、MSに比べて送信する機会が多くなる。そのため、BSからMSへのデータ伝送においては送信休止時間の影響により、データの伝送に要する時間 (伝送遅延時間) が長くなることが考えられる。

2.2.2 キャリアセンス回路の設置

無線回線における同一チャネルの干渉を防ぐために、無線設備にはキャリアセンス回路の設置が義務づけられている。そして、その回路において、無線回線でキャリアがあると識別するレベル (キャリアセンスレベル) は低い値 (4.47 μ V) に設定されている。そのため、キャリアの検知感度が必要以上に高く、1つの

無線LANシステムにおいて同一チャネルを同時に使用することを困難にしている場合が多い⁸⁾。このことは、1つのシステムで共通に使用する制御チャネルに与える影響を考えると考えられる。制御チャネルはデータの伝送に先立って必ず用いられることから、その利用効率がデータの伝送の効率を左右することになると考えられる。

以上のことから、特定小電力無線規格を適用して無線LANを実現する場合、「BSからMSへのデータ送信における伝送遅延時間の短縮」、および「制御チャネルの効率的な利用方法の実現」が主な課題であることが明らかになった。従って、これらの課題を解決することによって実用的な工場内無線LANシステムを提案できると考えられる。

3. 工場環境に適した無線LANシステムの提案

本章では、前章で検討した課題を解決するような工場環境に適した無線LANシステム (Cellular Local Area Radio Network: CELARN) を提案する。

3.1 ネットワーク構成

CELARNの構成をFig. 1に示す。CELARNは無線基地局 (BS) で制御される無線ネットワークと、BS相互を接続するリング状の有線ネットワークから構成されるセル方式の移動通信ネットワークである。これは、上位層である有線ネットワークとそれぞれのセルを制御する下位層の無線ネットワークとの2層構造になっていると見ることもできる。無線ネットワークにおいてはパケット形式のデータがBSと移動端末 (MS) 間で伝送される。ほかの無線ネットワークとの間のデータ伝送は有線ネットワークを介して行われる。有線ネ

ットワークにおいてはデータフレームと呼ばれるフレーム構成でデータは取り扱われ、データフレームはBS間で循環する。BSはデータフレームを受け取ると、そこからデータを取り出す。それと同時に、BSはMSからのデータをデータフレームに付加し次のBSへ送る。

3.2 無線回線

無線回線は上り回線と下り回線とから構成される。上り回線においてMSからBSへデータが伝送され、一方下り回線においてはその逆の伝送が行われる。どの無線回線もデータチャネルと共通の制御チャネルを有している。本節ではこれらチャネルの利用方法について述べる。

3.2.1 データチャネル

それぞれの無線ネットワークにあらかじめ上り、下り1対のデータチャネルを割り当てる。ここで、上りデータチャネルは1-persistent CSMA方式⁹⁾で使用することにする。それに対し下りデータチャネルでは、データの送信をランダムに行くと送信休止時間の影響を大きく受け、伝送遅延時間が長くなってしまふ。そこで、有線ネットワークを循環するデータフレームによって転送されてくる複数のデータをまとめて連続的に送信することにする。

このデータ送信はデータフレームを受け取った時に同期して行われる。このことにより、送信休止時間の影響を低減し、伝送遅延時間を短縮できると考えられる。

3.2.2 制御チャネル

下り制御チャネルは全てのBSで用いられることから、このチャネルの利用効率を高めることが必要である。そこで、ランダムアクセス方式ではなく、あらかじめ決められた順序に従って各BSが下り制御チャネルを利用することにする。各BSは、制御チャネルを用いてあて先のMS名を報知し、次にそのMSに対して下りのデータチャネルでデータを伝送する。従って、MSは常時下りの制御チャネルで受信していれば自分あてのデータの有無を知ることができ、着信がある場合だけ下りデータチャネルで受信すればよいことになる。このように下り制御チャネルをあらかじめ決められた順序に従って利用することにより、衝突なく下り制御チャネルを利用することができる。

上り制御チャネルは、MSがBSに対し接続要求やデータチャネルの切り替えなどに用いられる。しかしながら、CELARNにおいては本節で述べてきたように、

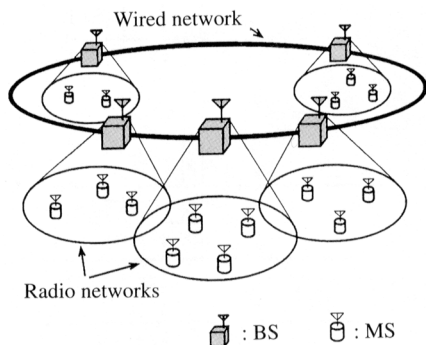


Fig. 1 Architecture of CELARN.

BSが下り制御チャネルを用いてデータの有無を知らせ、かつデータチャネルをあらかじめ割り当てる方法を用いる。そのため、上り制御チャネルを使う必要がないので、これを用いないことにする。

3.3 移動端末 (MS) の位置管理

MSの位置検出の方法として様々なものが提案されているが^{10, 11)}、受信レベルに基づいて位置を検出する方法が一般的である。CELARNでは、あらかじめ決められた順序に従って全てのBSが下り制御チャネルを利用することになっている。そこで、各MSで下り制御チャネルの受信レベルを比較し、最も高い受信レベルが得られるBSの管轄するセル内に存在すると判断する。この方法を用いることにより、MSは下りの制御チャネルを常時受信していれば、自分あての着信データの有無だけでなく、自己の位置検出もできることになる。なお、位置検出の結果はBSのメモリーに位置登録される。このメモリーを参照して、データの転送先であるBSが判断される。

3.4 伝送手順

本章では、前節までに述べた回線の利用方法および端末位置の管理方法に基づいて定めたデータ伝送手順を具体的に説明する。

ここでは i 番目のBS (以下, BS_i) が管轄するセル i に属する k 番目のMS (以下, MS_{ik}) から j 番目のBS (以下, BS_j) が管轄するセル j に属する l 番目のMS (以下, MS_{jl}) へのデータ伝送を例に挙げる。提案する無線LANシステムの伝送手順をFig. 2に示す。以下、「 MS_{ik} から BS_i への伝送」、「 BS_i から BS_j への伝送」および「 BS_j から MS_{jl} への伝送」に分けて、無線LANシステムの動作を説明する。

3.4.1 MS_{ik} から BS_i への伝送

MS_{ik} から BS_i へのデータ伝送は、上りデータチャネルでランダムアクセス (1-persistent CSMA) により行われる。そして、それに対する BS_i からのACKnowledgeまたはNon-ACKnowledgeが下りデータチャネルで伝送される。

3.4.2 BS_i から BS_j への伝送

BS_i における位置登録メモリーに蓄えられている位置情報に基づき、転送されてきたデータフレームから自分のセルに属するMSあてのデータを読み出し、自分のセル内のMSから送信されたデータを書き込んで次のBSに転送する。 BS_j においても BS_i で行われた同様な手順で、データフレーム内のデータの読み出しおよび書き込みが行われる。

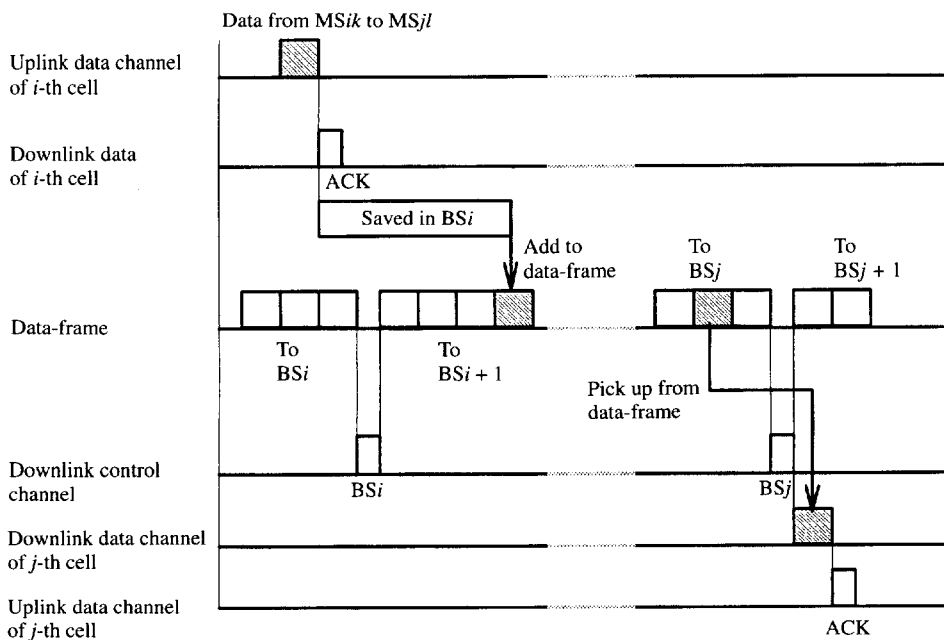


Fig. 2 Communication procedure.

3.4.3 BS_jからMS_jへの伝送

データフレームの読み出しおよび書き込みの際に、下りの制御チャンネルでMSあての着信データの報知がされる。それに続いて下りデータチャンネルでセル_jにいるMSあてのデータが一度にまとめて送信される。このようにすれば、データフレームから受け取ったデータを遅滞なくMSに伝送できる。なお、それに対するMS_jのACKまたはNACKなどの応答が上りデータチャンネルで伝送される。

以上の伝送手順を用いることにより、無線LANシステムに特定小電力無線を適用する場合の課題を解決することができ、工場内のデータ伝送に適した無線LANシステムを実現することができる。つまり、送信休止による伝送遅延時間の増加を、データフレームから受け取った複数のデータを連続的に送信することによって抑えることができるようになる。また、データフレームを下り制御チャンネルのトークンとして取り扱うことによって、あらかじめ決められた順序に従って効率よく下り制御チャンネルを利用できるようにしている。

3.5 CELARNの開発

提案したCELARNのパイロットシステムを開発し、前章で示した伝送手順を実行させるためのソフトウェアを搭載した。ここでは、開発したシステムの概要を紹介する¹²⁾。Fig. 3にパイロットシステムの構成を、Table 1にその基本諸元をそれぞれ示す。本システムは1200MHz帯の特定小電力無線局規格に準拠しており、以下に各構成部分の機能および特徴を述べる。

3.5.1 送信部

電圧制御水晶発振器 (VCXO) を用いて16kbpsの

NRZ符号のデータを直接MSK変調する方式を採用している。変調信号は周波数変換され、電力増幅部で10dBmに増幅されて送信される。

3.5.2 受信部

1200MHz帯の受信信号はLNAで増幅されてから中間周波数に変換される。その後、復調されてベースバンド信号になる。ここで復調には周波数検波が用いられる。受信信号の変動による伝送品質改善のために、2ブランチアンテナ選択ダイバーシティ受信^{13,14)}を用いている。この方式は、パケットの受信開始時にパケットの先頭にあるプリアンプルの部分でアンテナを切り替えて受信レベルを測定し、受信レベルの大きい方のアンテナを選択して情報部分を受信するものである。

Table 1 Specifications of pilot system.

Frequency	1217 ~ 1217MHz (for BS transmitting) 1252 ~ 1253MHz (for MS transmitting)
Channel spacing	50kHz
Frequency tolerance	2ppm
Bit rate	16kbps (radio network) 300kbps (wired network)
Modulation	MSK
Demodulation	Limiter-discriminator
Output power	10dBm
Reception sensitivity	-104dBm (BER : 10^{-2})
Antenna	Inverse-F type (for MS) 1/4 λ monopole (for BS)
Diversity reception	2 branch antenna selection
Dimension (W × D × H)	190 × 190 × 55 mm (MS) 190 × 88 × 200 mm (BS)

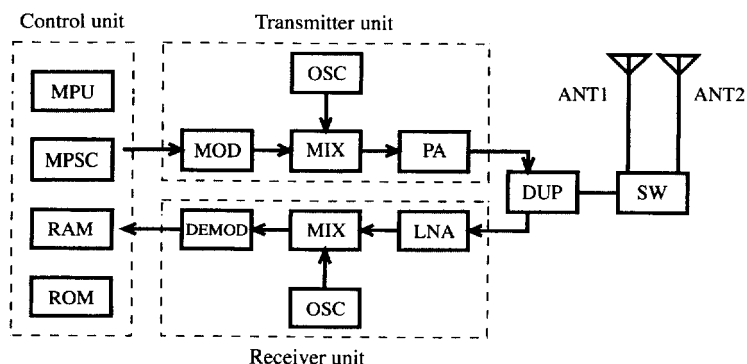


Fig. 3 Block diagram of pilot system.

3.5.3 制御部

制御装置は8bitのMPUを中心に、それぞれ32Kbyteの容量を持つROMおよびRAM、ならびにMPSC (Multi Protocol Serial Controller) で構成されている。提案している伝送手順はあらかじめROMに書き込まれ、それに従って送受信部の制御が行われる。なお、BSの制御部は有線ネットワークでのデータ伝送も制御している。制御部では、送信データの packets 化および受信 packets からのデータの抽出なども行っている。ここでは、CRC-CCITT ($X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$) に基づく誤り検出符号の付加および packets 誤りの検出が行われており、packets 誤りが検出された場合には送信側へ再送の要求が出される (Automatic Repeat reQuest : ARQ)。このARQと先に述べたダイバーシティ受信により、フェージングによる通信品質の劣化を改善している。なお、開発したパイロットシステムは規格で定められた無線伝送特性を満足していることを確認している。

パイロットシステムの外観をFig. 4に示す。BSではダイバーシティ受信用のアンテナをきょう体に取り付けているが、MSではそれを内蔵して、きょう体の表面に突起が無いようにしている。

4. 工場環境での性能評価

前章において工場環境に適する無線LANシステムとしてCELARNを提案した。ここでは、実際の工場環境において、それがどの程度の伝送性能を有するかを評価する。その際、工場内電波環境を実際に測定し、その結果を考慮している。

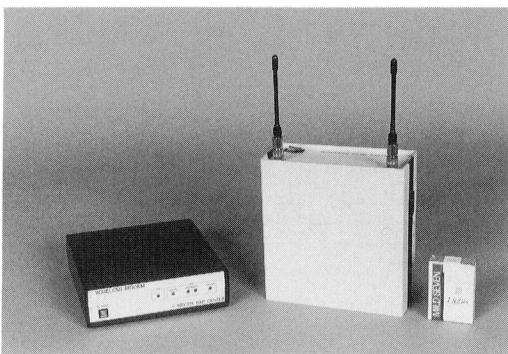


Fig. 4 Photograph of pilot system.
(Left side : MS, Right side : BS)

まず工場内電波環境を特徴づける電波伝搬特性と電波雑音特性の測定方法およびそれらの測定結果を示す。次にその測定結果を考慮し、伝送性能を評価する。

4.1 工場内の電波環境の測定

4.1.1 測定方法

電波伝搬特性および電波雑音特性の測定を自動車組立ラインで行った。そこには、ほぼ天井までの高さを有する組立ラインやロボットを用いたアーク溶接のラインが並んでいる。さらに、通路の上方にも組立部品を運ぶコンベアが取り付けられており、様々な工作機械が3次的に高密度に配置されている。

電波伝搬特性の測定において、移動台車を用いた移動測定が可能な14の測定コースを選んだ。測定コース長は延べ3.6kmである。一方、電波雑音測定において、工場稼動時に測定可能な3つの測定地点を選んだ。これらの地点は、測定範囲の中では最も電波雑音が多く発生すると考えられるアーク溶接機の間近に位置する。

電波伝搬特性の測定には、当所で開発した建物内電波伝搬特性測定用の移動台車を用いた (Fig. 5)。送信地点から1200MHz帯の電波を半波長ダイポールアンテナを用いて送信した。また、受信アンテナとして半波長ダイポールアンテナを用い、これを移動台車に取り付けた。なお、受信アンテナの高さはフォークリフトにおいてアンテナが取り付けられる2.1mとした。

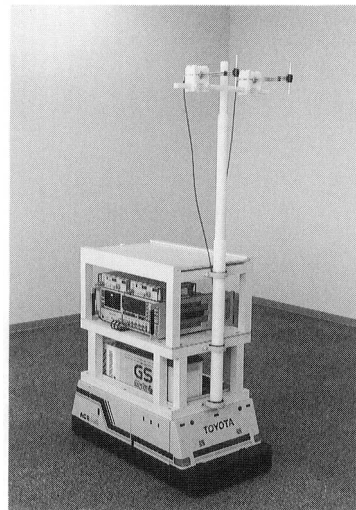


Fig. 5 Photograph of radio propagation measuring vehicle.

これらの測定系を用い、移動距離約12mmごとに受信電力を測定し、受信電力の場所的変動特性を求めた。

一方、電波雑音特性の測定にはスペクトルアナライザを用い、3分間の測定で得られた最大値（帯域幅1MHz）を雑音電力とした。

4.1.2 測定結果

受信電力の場所的変動特性は変動を作り出す原因の違いから、2つに大別することができる。つまり、送受信距離の変化にともなう平均的な受信電力の緩やかな変動（距離変動特性）と、多重波環境の中で移動することによる多重波相互の干渉状態の変化にともなう瞬時的な受信電力の激しい変動（瞬時変動特性）である。距離変動特性としては送受信距離と平均的な受信電力との関係を、瞬時変動特性としては受信電力の瞬時変動成分の累積確率分布をそれぞれ求める。

なお、送受信距離と平均受信電力との関係は、一般に下式のような近似式を用いて表される。

$$P_{re}[\text{dBm}] = P_0 - 10\alpha \log r \quad (1)$$

ここで α は距離減衰係数と呼ばれている。また、 P_0 は距離1mの地点での平均受信電力である。式(1)を用いることにより、送受信距離に対応する平均受信電力を簡単に求めることができる。

Fig. 6は測定した送受信距離と平均受信電力との関係を示したものである。この図から、距離減衰係数は約4.5となることがわかる。市街地での距離減衰係数は3.6程度^{10, 11)}であると言われていることから、今回測定した場所では市街地より急激に電波が減衰して

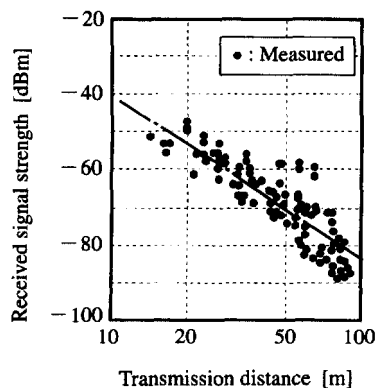


Fig. 6 Average received signal strength versus transmission distance.

いることがわかる。

次に受信電力の瞬時変動成分の累積確率分布を求める。その累積確率分布は、既知の分布（例えば、レイリー分布、ライス分布など）で近似して表すことにする。Fig. 7は地点による分布の割合を示したものである。この図からほとんどの測定コースにおいて受信電力の瞬時変動特性はレイリー分布で近似できることがわかる。

雑音電力は3地点で測定され、最も高い雑音電力は - 70dBmであった。その測定地点は溶接ロボットの導入されたラインから1m程度の距離に位置していた。また、測定中に測定地点の間近をフォークリフトや部品搬送車が頻繁に往来していたが、それによる雑音電力の増加は観測されなかった。

以上の測定結果から、工場内での電波環境はおおむね次の特性で表すことができると考えられる。

平均受信電力の距離変動特性は送受信距離の4.5乗に反比例する。

受信電力の瞬時変動特性はレイリー分布で近似できる。

- 70dBm程度の雑音電力が発生することがある。

従って、次節の性能解析はこれらの条件を考慮して行うことにする。

4.2 工場内の電波環境を考慮した性能評価

LANの性能を表す指標としてスループット、平均伝送遅延時間、データ廃棄率などがあるが、それらのう

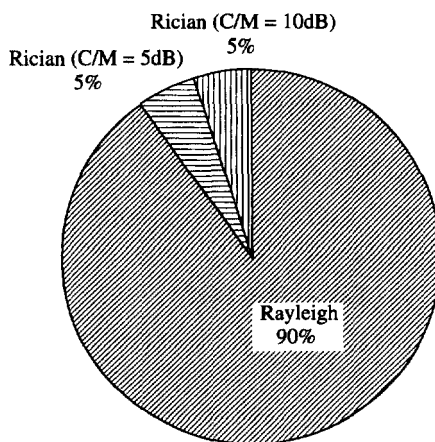


Fig. 7 Ratio of cumulative probability distributions of received signal strength.

ちでとくに無線LANシステムを利用する上で最も重要な平均伝送遅延時間に注目する。平均伝送遅延時間はデータが送信されて受信側に到着するまでの平均的な所要時間である。なお、ここでは平均伝送遅延時間を工場内の電波環境を考慮して解析的に評価する。その解析において次に示す仮定をおく。

いずれのBSも円形のセルの中心に位置する。

いずれのMSも同じ速さで互いにランダムな方向に移動する。

キャリアセンスが完全に機能しており、他局が送信している時に、同じ無線チャンネルで送信するMSは存在しない。つまり、隠れ端末はない。

衝突の生じたパケットは必ず消失する。つまり捕捉効果を考慮しない。

本節ではまず、セル内のパケット誤り率特性を電波環境を考慮して求める。次にその結果を用いて平均遅延時間を求める。

4.2.1 パケット誤り率

セル内の平均パケット誤り率 P_{ave} は以下のように求められる。

$$P_{ave} = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r P_p 2\pi r dr \quad (2)$$

ここで、 r 、 L_p 、および P_p はそれぞれセルの半径、パケットのビット長およびパケット誤り率を示す。パケット誤り率 P_p はビット誤り率 P_b から以下のように求められる。

$$P_p = 1 - \prod_{i=1}^{L_p} \{1 - P_b(r)\} \quad (3)$$

ここで、 Γ は信号電力対雑音電力比である。 Γ は(1)を用いて

$$\Gamma[\text{dB}] = P_{re} - N_0 \quad (4)$$

である。次にこのパケット誤り率を用いて、CELARNの平均伝送遅延時間を求める。

4.2.2 平均伝送遅延時間

フェージング環境下で、MSからMSへのパケット伝送に要する平均時間（平均伝送遅延時間） D を解析により求める。ここで、送信側のMSと受信側のMSとは異なるセルに属しているものとする。従って、 D は以下に示す3つの平均伝送遅延時間の和で表される。

送信側のMSからBSへの伝送にともなう平均伝送

遅延時間： D_1

BSからBSへの伝送にともなう平均伝送遅延時間： D_2

BSから受信側のMSへの伝送にともなう平均伝送遅延時間： D_3

MS→BS間伝送のスループットおよび平均伝送遅延時間を S_1 、 τ_1 、BS→BS間のそれを S_2 、 τ_2 、BS→MS間のそれを S_3 、 τ_3 とする。また、位置登録情報の平均伝送遅延時間を D_a 、データ伝送のそれを D_b とする。本ネットワークでは、MS→BS間の通信は1-persistent CSMA方式、BS→BS間およびBS→MS間の通信はデータフレームの転送に同期した方式を用いている。従って、 D は S_1 だけに依存し、 S_2 、 S_3 には依存しない。

最初に S_1 および D_1 を求める。移動通信環境下での S_1 は、理想的な回線において1-persistent CSMAを用いた場合のスループット解析結果に基づいて次のように表すことができる⁹⁾。

$$S_1 = \frac{nG(1+nG)e^{-nG}}{nG + e^{-nG}} (1 - P_p)(1 - P_c) \quad (5)$$

ここで、 G はトラフィックを表し、位置情報に関するトラフィック G_a とデータ伝送に関するトラフィック G_b との和からなっている。

一方 D_1 は、無線回線でのデータパケットの伝送時間、再送時のデータパケットの伝送時間および送信休止による平均遅延時間の和として次のように表すことができる。

$$D_1 = \tau_d + \frac{L_p}{R_1} + \left(\frac{nG}{S_1} - 1 \right) \left(\frac{L_c}{R_1} + \tau_1 + \tau_d + \frac{L_p}{R_1} \right) + \tau_h \quad (6)$$

ここで、再送時のデータパケットの伝送時間は、平均再送回数と再送に必要な時間との積で求められる。 τ_d はMS→BS間の平均送信待ち時間で、次の式で求められる。

$$\tau_d = \frac{1}{2} \frac{nG}{nG + e^{-nG}} \frac{L_p}{R_1} \quad (7)$$

下り無線回線では有線ネットワーク上のデータフレームの転送タイミングに同期して伝送を行っているため、 D_2 、 D_3 については以下のように求められる。

BS間のデータ伝送間隔を T とすると、各BSには mT 間隔ごとに有線ネットワークからデータフレームが送られてくる。この間に上り回線でMSからBSに伝送されてくるデータ量は $R_1 S_1 mT$ となる。このうち、位置

情報が $R_1 S_1 m T (G_a/G)$ 、データが $R_1 S_1 m T (G_b/G)$ である。ただし、位置情報はMSには伝送されない。また、データは m 局のBSに転送された後、MSに伝送される。よって、有線ネットワークおよび下り回線で伝送するデータ量の平均値である Q_{wa} および Q_{rb} は次のように表される。

$$Q_{wa} = R_1 S_1 m T \frac{G_a m}{G} \quad (8)$$

$$Q_{wb} = R_1 S_1 m T \frac{G_b m - 1}{G} \quad (9)$$

$$Q_{ra} = 0 \quad (10)$$

$$Q_{rb} = R_1 S_1 m T \frac{G_b}{G} \quad (11)$$

ここで、添え字"a"および"b"は、それぞれ位置情報およびデータを示す。 T は有線ネットワーク上での転送時間、下り制御チャネルの使用時間および有線ネットワークでの転送処理時間の和で表され、次式で与えられる。

$$T = \frac{Q_{wa} + Q_{wb}}{R_2} + \frac{L_c}{R_3} + \tau_2 \quad (12)$$

D_2 は、有線ネットワークで転送に要する平均時間と、上り回線で伝送された情報が有線ネットワークで転送されるまでBSに留まる平均時間 $m T/2$ との和で表され、次式で与えられる。

$$D_2 = mT + \frac{(2m - 1) T}{2} = \frac{(2m - 1) T}{2} \quad (13)$$

また、 D_3 は、制御チャネルによる着信MS名の報知時間、データチャネルでの平均伝送時間、平均再送時間および送信休止による平均遅延時間の和として以下のよう表せる。

$$D_3 = \frac{L_c}{R_3} + \frac{Q_{rb}}{2R_3} (1 - P_p) + \left(\frac{Q_{rb}}{R_3} + \tau_3 + \frac{Q_{rb}}{2R_3} \right) P_p + \tau_h \quad (14)$$

以上の結果を用いて工場内にCELARNを導入した場合の平均伝送遅延時間を計算する。

4.2.3 計算結果

ここでは前章の電波環境の測定結果を含んだTable 2に示す条件で伝送性能を求める。まず、セルの大きさに応じたパケット誤り率の変化を求めることにする。セル内にMSが一様に分布している場合のセル半径に対するパケット誤り率をFig. 8に示す。セル半径が大きくなるほどセルの中心から離れて位置するMS

の割合が増えるため、パケット誤り率が増加することがわかる。次にこのパケット誤り特性を伝送遅延時間

Table 2 Parameters used for performance analysis.

Item	Symbol	Value
Number of BS	m	10
Number of MS per cell	n	10
Bit rate in radio network	R_r	16 (kbps)
Bit rate in wired network	R_c	400 (kbps)
Signal degradation factor	α	4.6
Received signal power factor	P_0	10.5 (dBm)
Noise power	N_0	-90.7 (dBm)
Data packet length	L_d	1024 (bit)
Control packet length	L_c	100 (bit)
Process time of re-transmission in radio network	τ_r	30 (msec)
Process time of re-transmission in wired network	τ_c	20 (sec)
Average delay for transmitting halt in radio network	τ_h	2 (sec)
Average speed of each MS	v	10 (km / h)
Traffic	G	-
Time period of transmission data-frame among BSs	T	-
Average volume of data on downlink channel	Q_{rb}	-

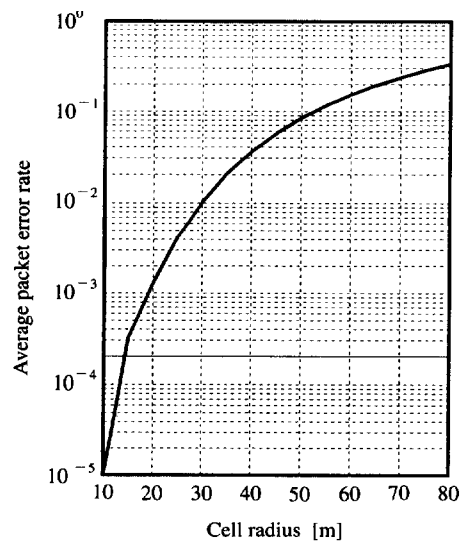


Fig. 8 Packet error rate versus cell radius.
(Packet length : 1024[bit])

特性の計算に考慮する。Fig. 9にトラフィックに対する平均伝送遅延時間の変化を示す。ここではパケット誤り率を一定にして伝送遅延時間を求めた。ここで用いた計算条件ではトラフィックが毎秒100ビット程度までは伝送遅延時間はほぼ一定であり、安定してネットワークが動作することがわかる。そこで、トラフィックを毎秒100ビットと一定にしてセル半径の変化に応じた平均伝送遅延時間の変化を求めた、その結果をFig. 10に示す。これによれば、セル半径が60m以内の場合は伝送遅延時間はほぼ一定であることがわかる。従って、ここで計算した条件では、平均伝送遅延時間に対するパケット誤りの影響はセル半径が60mを越えると大きくなることがわかる。

5. むすび

工場環境で良好な伝送特性が得られる無線LANシステムCELARNを提案した。その構成、無線回線（データチャンネルおよび制御チャンネル）の利用方法、および伝送手順を示した。さらに、工場内の電波環境を考慮して性能を評価した。

提案したCELARNは、複数の無線ネットワークと、その無線ネットワークを統合する有線ネットワークから構成されるセルラー方式の無線通信ネットワークである。CELARNでは、有線ネットワークと無線ネット

ワークの伝送手順が統合され、以下の特徴をもっている。

複数のデータをまとめて連続的に送信することにより、BSにおける送信休止による伝送遅延時間の増加を抑えることができる。

有線ネットワークで転送されるデータフレームを下り制御チャンネルのトークンとして使用できるようにすることにより、同チャンネルを効率よく利用できる。

MSでは、下り制御チャンネルを受信することにより、着信データの有無だけでなく、自己の存在する位置（セル）を検知できる。

工場などの生産現場における無線LANシステムではMSの位置を管理し、データを一定の時間内に確実に伝送することが生産性向上のための必要条件である。CELARNは上記の特徴によりその条件を満たすので、工場環境で用いるのに適したものといえる。

さらにCELARNを実用的な環境に導入する場合の伝送性能を評価した。その結果、CELARNは劣悪な電波環境においてもある大きさの通信エリアまでは安定した伝送遅延時間を維持できる特性のあることがわかった。この報告では、自動車組立工場に導入した場合に、ある計算条件で、セルの半径が60m以内で平均伝送遅延時間がほぼ一定になることを示した。

最後に、この研究を行うにあたり、情報通信研究室および機電技術課の皆さんに熱心にご討議、ご協力いただきました。

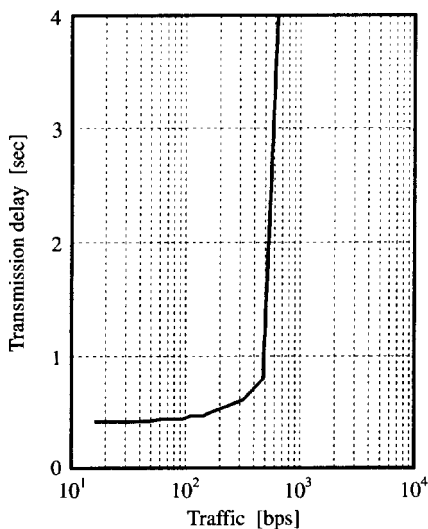


Fig. 9 Time delay performance versus traffic.
(Packet error rare : 8×10^{-2})

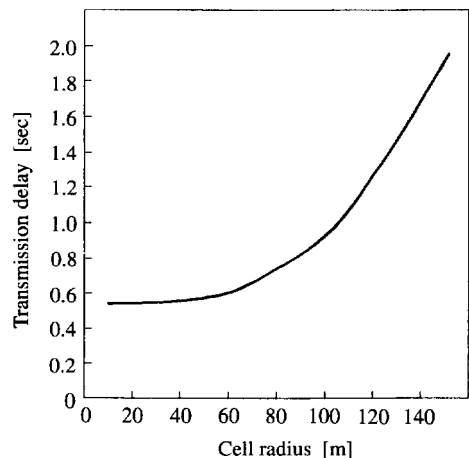


Fig. 10 Transmission delay versus cell radius.

参 考 文 献

- 1) 無線を利用した構内ネットワークに関する調査研究報告書, (1985), 郵政省
- 2) Marcus, M. J. : "Regulatory policy consideration for radio local area networks", IEEE Commun. Mag., 25-7(1987), 95
- 3) McKenny, P., et al. : "Physical- and link-layer Modeling of packet-radio network performance", IEEE J. Sel. Areas Commun., 9-1(1991), 59
- 4) Sinha, R., et al. : "Mobile packet radio networks : state-of-the-art", IEEE Commun. Mag., 23-3(1985), 53
- 5) 小電力無線局解説書, (1989), 電波システム開発センター
- 6) 1200MHz帯データ伝送用特定小電力無線設備標準規格 (RCR STD-16), (1989), 電波システム開発センター
- 7) 柴田伝幸, ほか2名 : "小電力無線に適したワイヤレス LANの提案", 電子情報通信学会技術研究報告, IN91-116(1991), 19
- 8) 濱辺孝二郎, ほか3名 : "2GHz帯ビル内伝搬実験結果に基づくフロア間周波数再利用条件の検討", 電子情報通信学会技術研究報告, RCS90-40(1990), 79
- 9) Kleinlock, L., et al. : "Packet switching in radio channels: part I- Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics", IEEE Trans. Commun., 23-12(1975), 1400
- 10) 桑原守二 : 自動車電話, (1985), 電子通信学会
- 11) 進士昌明 : 移動通信, (1990), 丸善
- 12) 山田直之, ほか3名 : "小電力無線に適したワイヤレス LANの開発", 電子情報通信学会技術研究報告, IN91-117(1991), 25
- 13) Akaiwa, Y. : "Antenna selection diversity for framed digital signal transmission in mobile radio channel", in Proc. of the 39th IEEE Vehicular Technol. Conf., (1989), 470
- 14) 柴田伝幸, ほか2名 : "構内移動通信におけるアンテナ選択ダイバーシティのパケット誤り率改善効果", 1991年電子情報通信学会春季全国大会講演論文集, B-398(1991), 2-398

著 者 紹 介



柴田伝幸 Tsutayuki Shibata

生年 : 1961年。

所属 : 情報通信研究室。

分野 : 無線LANの開発および性能解析に関する研究。

学会等 : 電子情報通信学会会員。



山田直之 Naoyuki Yamada

生年 : 1962年。

所属 : 情報通信研究室。

分野 : 無線LANの開発および性能解析に関する研究。

学会等 : 電子情報通信学会会員。



浅野孔一 Yoshikazu Asano

生年 : 1957年。

所属 : 情報通信研究室。

分野 : 移動通信環境におけるアンテナ特性の最適化および無線LANの性能解析に関する研究。

学会等 : 電子情報通信学会会員。