

IEEE 802.15.4 の都市部における屋外電波特性の実地調査

有吉 康夫[†] 羽鳥 敦士[†] 石田 泰之^{††} 大野 貴弘^{††} 戸辺 義人^{†††}

[†]東京電機大学 工学部 情報メディア学科

^{††}東京電機大学 工学研究科 情報メディア学専攻

^{†††}東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科

近年、環境モニタリングへの関心の高まりから、屋外におけるセンサネットワークが展開されている。しかしながら、都市のように人工物が密集した地域では、センサを設置できる場所は制限される。さらに、センサは電池によって駆動するため、長期間の環境モニタリングを実現するためには、省電力な無線ネットワークを構築する必要がある。このような需要の高まりから、省電力で、ネットワークに参加できるデバイス数の多い無線規格として、IEEE 802.15.4 が注目されている。しかしながら、IEEE 802.15.4 はもともと家電向けの無線規格であり屋内環境を想定している。そのため、屋外で使用する場合は、センサやデータ転送装置の設置に先立ち、障害物の影響や周辺環境による電波の減衰率や反射を考慮する必要がある。そこで我々は、都市部屋外において、IEEE 802.15.4 の電波特性の実地調査を行い、環境における電波の減衰率の定式化を行った。

Survey of the Outdoor Radio Property of IEEE 802.15.4

Yasuo Ariyoshi[†] Atsushi Hatori[†] Yasuyuki Ishida^{††} Takahiro Ono^{††} Yoshito Tobe^{†††}

[†]School of Engineering, Tokyo Denki University

^{††}Course of Information Systems and Multimedia Design, Tokyo Denki University

^{†††}School of Science and Technology for Future Life, Tokyo Denki University

Recently, environmental monitoring has been received high attention in many areas, and various kinds of sensor networks for outdoor monitoring have been developed. IEEE 802.15.4 standard is a candidate among short-range wireless communications for sensor networks. It has an advantage of low power consumption which leads to long-lived monitoring without the necessity of replacing the batteries. However, the standard aims at indoor usage such as home appliance. In case we use IEEE 802.15.4 for outdoor environmental monitoring, it is necessary to pay attention on power attenuation due to surrounding obstacles and complex environment. Therefore, we have performed outdoor experiments to study radio characteristic of IEEE 802.15.4 in this paper.

1. はじめに

近年、環境モニタリングへの関心の高まりから、屋外におけるセンサネットワーク^{[1][5][6]}が展開されている。しかしながら、都市のように人工物が密集した地域では、センサを設置できる場所は制限される。さらに、センサは電池によって駆動するため、長期間の環境モニタリングを実現するためには、省電力な無線ネットワークを構築する必要がある。このような需要の高まりから、省電力で、ネットワークに参加できるデバイス数の多い無線規格として、IEEE 802.15.4 が注目を集めている^[2]。しかしながら、IEEE 802.15.4 はもともと家電向けの無線規格であり屋内用である。そのため、屋外で使用する場合は、センサやデータ転送装置の設置に先立ち、障害物の影響や周辺環境による電波の減衰率を考慮する必要がある。そこで我々は、都市部屋外において、IEEE 802.15.4 の電波特性の実地調査を行い、環境における電波の減衰率の定式化を行った。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章で、関連研究に関して説明する。3 章で、IEEE 802.15.4 の特徴について述べる。4 章で電波特性実験に関して説明と結果について述べる。5 章で定式化に関して述べ、6 章で結論を延べる。

2. 関連研究

ハーバード大学は、都市センサネットワークのテストベッドとして CitySense^[4] というシステムを構築して

いる。これは、端末のセンサノードにも 100 台以上の Linux 搭載端末を用い、すべての端末を遠隔操作できる。都市センサネットワークの構築には莫大な時間と費用が必要なので、実際にセンサを配置する前の効率的な通信プロトコルの検証などに使用されている。CitySense でも電波特性を計算することができるが、規格が 802.11 a/b/g であり、IEEE 802.15.4 ではないため、CitySense によって、本論文で計測したような省電力な無線規格における電波特性は計測できない。また、端末ノードを移動することができないため、より細かい電波特製を計測することができない。

慶応大学の AiryNodes^[3] という研究では、uPart という微小センサを用い、都市の公園における微気象現象を観測した。新宿御苑内のみという限られた範囲内であったが、観測場所によって気温差が生じることが観測されている。しかし、この研究では観測場所が管理された公園内で完結しており、都市における微気象現象を観測する場合は、道路やビルなどの建造物における効率的な配置を議論していない。

このように、センサネットワークの研究は進んでいるが、都市における電波特性に焦点を当てた研究は行われていなかった。環境モニタリングを行う場合、多くのセンサを設置する必要があるため、環境における電波特性の調査は不可欠である。そこで我々は、都市部屋外における IEEE 802.15.4 の電波特性の実地調査を行い、都市部屋外における IEEE 802.15.4 によるセンサネットワーク構築に向けたデータを提供する。

3. IEEE 802.15.4 の特徴

本章では、短距離無線通信規格である IEEE802.15.4 について概説する。

IEEE802.15.4 は 2003 年に IEEE802.15 ワーキング・グループに承認されたことにより注目された比較的新しい無線規格であり、省消費電力・低コスト・ネットワークに参加できるノードの台数を主眼において開発された、屋内通信向けの無線規格である。

表 1 に IEEE802.15.4, IEEE802.15.11b, IEEE802.15.1 の性能を示す。表を見ても明らかであるが、IEEE802.15.4 は他 2 つの無線規格に比べ通信速度が遅く、通信距離も 30[m]と、比較的短めである。そのため、転送速度が遅くてもかまわない家電の遠隔制御など、主に屋内用の無線規格として利用が進んでいる。

また、IEEE802.15.4 は省電力な無線規格であるため、バッテリー寿命が数ヶ月から数年であり、他の無線規格と比較すると、数百倍長い。更にネットワークに参加できるノード数も 65536 と充分であるため、センサネットワークへの応用が進んでいる。そのため、都市部におけるセンサネットワークとして IEEE 802.15.4 を評価することにした。

表 1. IEEE 802.15.4.X の無線規格

IEEE 規格	802.15.4	802.15.11b	802.15.1
マーケット名	ZigBee	Wi-Fi	bluetooth
周波数[GHz]	2.4	2.4	2.4
通信速度[bps]	250K	11M	1M
通信距離[m]	30	100	10
ネットワーク接続 台数(最大)[ノード]	65536	32	7
バッテリー寿命	数ヶ月～ 数年	数時間	数日
送信電力	-3dBm	10~20dBm	0dBm
主な用途	計測制御	無線 LAN	音声伝送

4. 電波特性実験

本章では、実地調査で実施した実験に関して述べる。

4.1. 実験機器

今回実験では OS テクノロジー社製の ZigBee コーディネータ, ZigBee ルータ, ZigBee エンドデバイスを用いた。表 2, 3, 4, 図 1, 2 に詳細を示す。ZigBee エンドデバイスはセンサノードであるため、温度センサを搭載している。また屋外実験ではデータ受信用 PC 駆動のため屋外用バッテリー(IFONIX PG-421SP)を用いた。

表 2. コーディネータの仕様

役割	データ収集用ノード
製品名	ZB04-OAP
電源	DC5.0 [V]
消費電力	240 [mA]
無線周波数	2.4 [GHz]
通信速度	250 [Kbps]
通信方法	LAN 接続, IEEE802.15.4

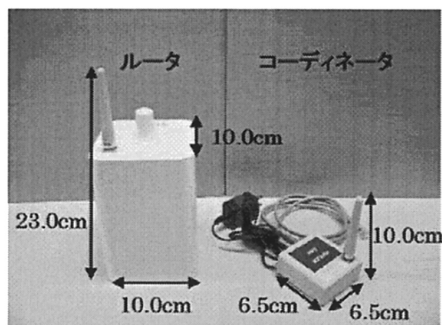


図 1. 実験使用器具: ルータ, コーディネータ

表 3. ルータの仕様

役割	データ転送ノード
製品名	ZB04-COAP
電源	DC5.0 [V]
消費電力	70 [mA]
無線周波数	2.4 [GHz]
通信速度	250 [Kbps]

表 4. エンドデバイスの仕様

役割	センシング
製品名	ZB08-CHG
センシング対象	温度[°C]
電源	Li-ion 電池
動作時電流	55 [mA]
バッテリー寿命	30[s]感覚で約 4 ヶ月
無線周波数	2.4 [GHz]
通信速度	250 [Kbps]

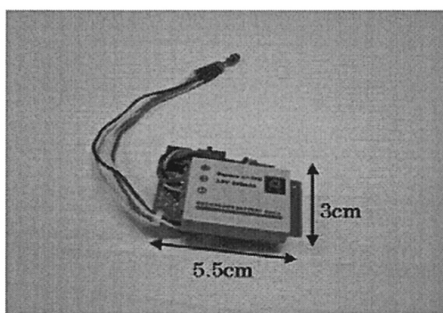


図2.実験使用器具：エンドデバイス



図4. 屋内実験の写真

4.2. 屋内実験

都市部屋外での様々な環境下での距離と RSSI の変位測定実験（以下屋外実験）を行う前に、比較用のデータを屋内で取得した。

図3に実験アーキテクチャ、図4に実験風景を示す。

実験場所は図5のように長さが40[m]あり、途中に無線通信の障害物となりえる物が無く周囲が鉄筋コンクリートで覆われている屋内で行った。実験は図4のシステムイメージのようにエンドデバイス×1・ルータ×2・コーディネータ×1・データ取得用PC×1から構成されるシステムで、受信側のルータ2が送信側ルータ2へ送信されるメッセージのRSSIをメッセージに載せコーディネータに送信するように設定した。

実験方法は2つのルータを一定の距離で設置し、5秒に1回送信されてくるエンドデバイスからのメッセージをエンドデバイス→ルータ1→ルータ2→コーディネータの順にマルチホップさせる。一定の距離で設置したルータ間でメッセージがホップした際に、受信側のルータが送信側から送られてきたメッセージのRSSIを測定し、その値をメッセージに乗せることでルータ間のRSSIを測定する。この方法をルータ間の距離5・10・15・20・30・40[m]の各距離に対して行った。

今回の実験では2つのルータの距離を一定距離で設置し、エンドデバイスからコーディネータにマルチホップして送られてくるメッセージを10分間の約120回分のメッセージを取得する。また、受信メッセージのRSSIのうち、上下5%を排除した平均値をその距離のRSSIとする。

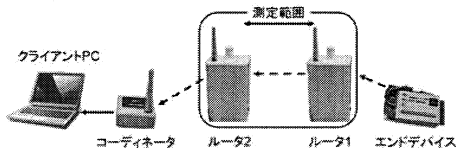


図3. 実験アーキテクチャ

4.2.1. 屋内実験結果

屋内実験結果のグラフを図5に示す。

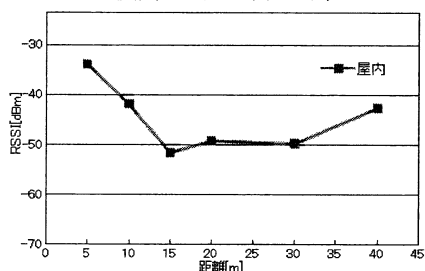


図5 屋内RSSI測定結果

図5より屋内は、ルータ間の距離が伸びてもRSSIが減衰しないことが分かる。これは、実験場所が周囲を鉄筋コンクリートで囲まれており、ルータから発信された電波を吸収・拡散させる要素が無いため、RSSIがそれほど減少しなかったと考えられる。また、30[m]でのRSSIよりも40[m]でのRSSIのほうが高い値を出している。これは、40[m]測定時の観測地点が壁際であり、電波の反射効果によりRSSIが高くなったためだと考えられる。

4.3. 屋外実験

屋内実験を基に屋外実験を行った。実験方法は屋内実験と同様に、2つのルータを一定の距離で設置し、5秒に1回送られてくるエンドデバイスからのメッセージを、エンドデバイス→ルータ1→ルータ2→コーディネータの順にマルチホップさせ、一定の距離で設置したルータ間でメッセージがホップした際に受信側のルータが送信側から送られてきたメッセージのRSSIを測定し、その値をメッセージに乗せることでルータ間のRSSIを測定する。

今回の実験では2つのルータの距離を基礎実験と同様に変化させて測定した。デバイスから送られてくる

メッセージは10分間約120回分のメッセージを取得する。この方法をルータ間の距離 5・10・15・20・30・40[m]の各距離に対して取得し、上下 5%の異常値を除いた平均値をその距離での RSSI 値とした。

4.3.1. 屋外実験実施地点

屋外実験場所を選択するにあたって都市部においてセンサノードを用いた環境モニタリングを行うであろう場所を考慮した結果、川、池、噴水など水辺における電波特性の影響、センサによる構造物の耐震計測が行われる鉄道、高速道路橋などの構造物、センサにより交通量の計測が行うことが可能な大通り沿い、樹木や地面（土）の影響が考えられる公園などの場所を選出した。

これらを考慮した結果、上記 6 箇所の場所で RSSI を測定した。実施場所、実験環境を表 5 から表 7、図 6 から図 10 に示す。

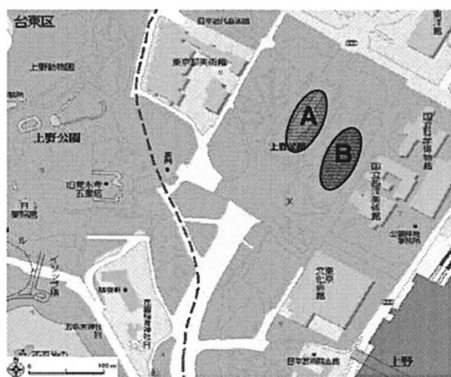


図 6 上野公園の実験箇所(A, B)

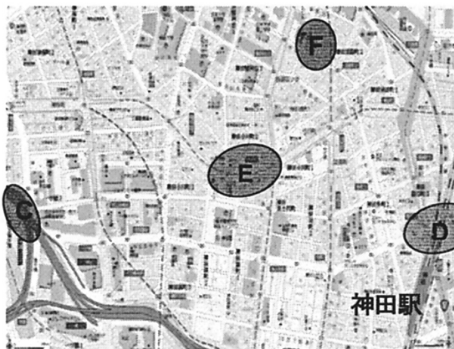


図 7 神田周辺の実験箇所(C~F)

表 5 A, B 地点の特徴

A 地点:噴水横 水辺による影響を測定	
周辺環境	周辺に噴水と池が存在する。測定場所の横は池である。
地面	コンクリート
B 地点:並木下 樹木による影響を測定	
周辺環境	樹木が密集している。測定場所直下はコンクリートで舗装されて、横は土が存在する。
地面	土、コンクリート



図 8 A, B 地点実験環境の様子

表 6 C, D 地点の特徴

C 地点:高速道路下 高速道路の影響を測定	
周辺環境	上部に高速道路の高架橋が存在。交通量が多い。
地面	アスファルト
D 地点:鉄道高架橋下 鉄道等の影響を測定	
周辺環境	上部に鉄道高架橋があり、周囲が鉄筋コンクリートの壁に囲まれている。
地面	アスファルト



図 9 C, D 地点実験環境の様子

表7 E, F地点の特徴

E 地点:大通り沿い 自動車・建物等の影響を測定	
周辺環境	交通量が多い。構造物に囲まれている。
地面	タイル、アスファルト
F 地点:公園 地面(土)による影響を測定	
周辺環境	木、植物、遊具(鉄製)などがあり、地面が土である。
地面	土



図10 E, F地点実験環境の様子

4.4. 実験結果

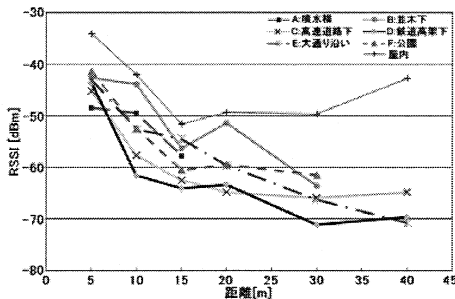


図11 屋外 RSSI 測定結果

実験結果を図11に示す。屋内実験結果と比べると、屋外ではすべての環境において電波強度の減衰率が高いことが分かる。これは屋内の実験にくらべ実験場所周囲が囲まれていないためだと考えられる。また、ルータから発信された電波が吸収されたという理由も考えられる。それに加え、同じ屋外でも急激に減衰するものと一定の割合で減衰する場所に分類できることがグラフより分かる。

噴水横と公園に関しては測定場所の広さに限界があったため、図11のRSSIは、それぞれの測定可能な限界値15[m], 30[m]までである。

5. 考察

本章では、屋外における電波強度の減衰率が、すべての観測場所において、屋内の電波強度を下回った理由を考察し、カーブフィッティングを行って、特定環境における電波特性を定式化する。

5.1 電波減衰原因

屋外における電波強度が、屋内における電波強度を下回った理由として、屋内での周囲を鉄筋コンクリートで覆われていることによる電波の反射と、屋外での障害物による電波の吸収があげられる。他に、ルータアンテナ間の直線電波空間に障害物が存在しないため、周囲の物質に電波が吸収され、結果として、受信電波が減衰したと考えられる。また、IEEE 802.15.4は省電力な無線規格なので、ノイズによって電波が減衰したとも考えられる。

特に減衰率が高い観測場所は、実験場所C(高速道路下)、D(鉄道高架下)、F(公園)である。実験場所CやDは、車や鉄道の往来が多い。さらに、トンネル状の環境の影響で、騒音が激しい場所でもある。よって、それらのトンネル効果により増幅されたノイズにより、電波が減衰したと考えられる。実験場所Fの公園に関しては、周囲にノイズを発生させる原因がないものの、土や緑など、水分を多く含む物質が多く存在しているので、それらに電波吸収され、急激に電波が減衰したと考えられる。

実験場所B(並木下)において実験場所F(公園)と同じく緑が多いにも関わらず電波の減衰が低いのは、地面がコンクリートであったため電波が反射したからだと考えられる。

実験場所E(大通り沿い)の電波強度が一様に減衰しているのは、電波の吸収・反射の原因となるような物質や障害物が存在しなかったからであると考えられる。

5.2 電波減衰率の定式化

この実験結果を元に、各環境での電波の減衰特性を近似モデル化する。RSSIを次の(1)式で近似することとする。

$$RSSI = \frac{P}{d^\alpha} \quad (1)$$

d:距離。P:電波強度(カーブフィッティング時に算出)

電波はアンテナを中心に広がるため、単位面積当たりの電波強度はアンテナとの距離が離れると減衰する。このことから α は1~3に収まることが予想される。

上記の近似式に対して20m地点までの α を求めると表8のようになった。

表 8 各環境下での環境変数 α

環境	環境変数 α
屋内	2.7
並木下	1.1
高速道路下	3.7
鉄道高架下	4.5
大通り沿い	2.9
公園	3.6

下記の図 12, 図 13 にカーブフィッティングで求めたグラフを示す。グラフの数が多いため, 2 つの図に分割して示している。

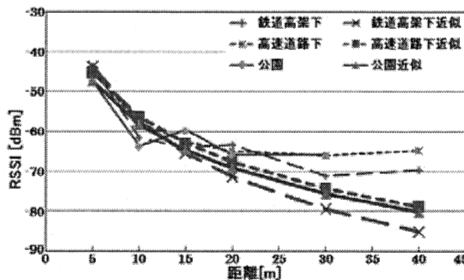


図 12 カーブフィッティング結果(1)

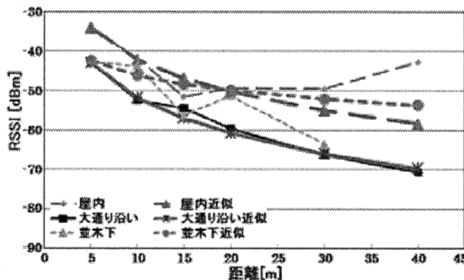


図 13 カーブフィッティング結果(2)

表 8 より, 並木通りのようなオープンスペースでは α が小さい値を示すのに対して, 高速道路下等の遮蔽物がある環境においては α が大きくなることからわかる。

図 12, 13 を見ると, 距離が長くなるほど, 実際に観測された値と, カーブフィッティングによって求めた値の誤差が大きくなっている。一番誤差が小さいのは, 大通り沿いの値である。これは, 大通り沿い以外の環境は観測距離ごとの特性が一樣ではなかったことが原因として考えられる。たとえば, 鉄道高架下の環境は,

壁だけでなく柱が存在し, 電波の伝搬環境が複雑になるため, 距離が長くなるにつれ, カーブフィッティングの結果との誤差が大きくなったと考えられる。今後は, このような複雑環境においては, 環境要因に対してより精度の高い観測が必要であると考えられる。

6. むすび

本稿では, 都市部屋外における IEEE 802.15.4 の電波特性の調査結果に関して述べた。結果から, 測定場所によって電波強度の減衰率に違いがみられた。さらに我々は, 減衰率と測定場所の相関関係に関して考察し, 特定環境における電波の減衰率を定式化した。

導き出された定式を用いて, 今後は都市センサネットワーク構築の際に「木の多い公園内でも, 地面が舗装されている場所とされていない場所でデバイス間の距離を変える」など, 効率的な環境モニタリングシステムにつなげる。

参考文献

- [1]. Eisenman, S., Miluzzo, E., Lane, N., Peterson, R., Ahn, G.-S. and Campbell, A.: The BikeNet mobile sensing system for cyclist experience mapping, Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems, Sydney, Australia, ACM, pp.87–101 (2007).
- [2]. Ito, M., Katagiri, Y., Ishikawa, M. and Tokuda, H.: Airy Notes: An Experiment of Microclimate Monitoring in Shinjuku Gyoen Garden, 4th International Conference on Networked Sensing System (INSS 2007), pp.260–266 (2007).
- [3]. Kohvakka, M., Kuorilehto, M., Hännikainen, M. and Hämmäläinen, Timo D: Performance analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications, Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor and ubiquitous networks, Terromolinos, Spain (2006).
- [4]. Murty, R., Mainland, G., Rose, I., Chowdhury, A., Gosain, A., Bers, J. and Welsh, M.: City-Sense: A vision for an Urban-Scale Wireless Networking Testbed, Technical report, Harvard University (2007).
- [5]. Nath, S., Liu, J., Miller, J., Zhao, F. and Santaniche, A.: SensorMap: a Web site for sensors world-wide, Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, Boulder, Colorado, USA, ACM, pp.373–374 (2006).
- [6]. Ono, T., Isizuka, H., Ito, K., Ishida, Y., Miyazaki, S., Mihirogi, O. and Tobe, Y.: UScan: Towards Fine-Grained Urban Sensing, International Workshop on Real Field Identification (RFId 2007), pp.18–27 (2007).