

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20904

研究課題名(和文)人体通信チャンネルモデルの高精度化

研究課題名(英文)Accuracy enhancement of the intrabody communication channels

研究代表者

羽賀 望 (Haga, Nozomi)

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号：50638476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：実測データに基づき、人体通信チャンネルの統計モデルを構築した。そして、通信機の接地条件によっては複雑な特性を有する受信電圧の確率密度分布が、複数の正規分布の重ね合わせで表現できることを明らかにした。

また、人体通信チャンネルに影響を与えうる伝導ノイズ電流についても検討を行なった。具体的には、3線ACケーブルに同相で流れる電流を「3線コモンモード電流」と定義し、一般的なAC/DCコンバータが3線コモンモード電流を発生させることが回路シミュレーションと実測の両方で確認された。

さらに、モーメント法をベースとした電氣的超小形デバイスの回路モデリング手法を考案した。

研究成果の概要(英文)：A statistic model for the intrabody communication (IBC) channels are considered. It was clarified that the complicated probability density of the received voltage can be modeled by multiple normal distributions.

Besides, the conducted noise currents, which may affect the IBC channels, were considered. The currents flowing on a three-line AC cable in phase are defined as "three-line common-mode currents." Then, it was confirmed that the three-line common-mode currents are generated by a general AC/DC converter both via circuit simulations and measurements.

Furthermore, a circuit modeling technique for electrically-very-small devices was developed based on the method of moments.

研究分野：アンテナ・伝播

キーワード：人体通信

1. 研究開始当初の背景

ウェアラブル機器が人体周囲で行う無線通信は人体通信と呼ばれており、医療や業務支援、個人認証システムへの応用可能性があることから、世界中で研究が行われている。図1に、人体通信の概念図を示している。

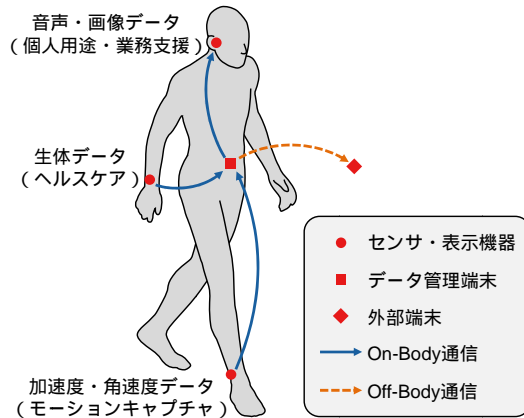


図1 人体通信の概念図

人体通信を利用した製品が広く普及するためには、通信の安定性など、信頼性が不可欠であるが、ここで重要となることの一つは、通信チャネルの性質を正確に把握することである。メガヘルツ帯を用いた人体通信は、物理的には静電結合により信号を伝送するものであるため、従来、通信チャネルは静電容量による回路モデルとして表現されていた。しかしながら、従来のモデルでは表現できない現象があることが課題であった。

そこで、これまでに研究代表者は、通信チャネルの等価回路が静電界解析によって正確に求められることを示し、この改良された等価回路モデルによって、通信機の接地条件に対する通信特性の依存性や、人体の姿勢、大地の影響などを明らかにしてきた。また、メガヘルツ帯では他の電子機器の電源回路などが発するノイズに対する対策が非常に重要であるので、電界として空間に放出されているノイズ(いわゆる放射ノイズ)の影響を含んだ等価回路モデルも提案してきた。

2. 研究の目的

しかしながら、これまでに提案してきた等価回路は、理論的な扱いの容易さのため、全て静電界と見なせる周波数帯においてのみ成立するものである。通信機がバッテリー駆動の場合は、このモデルでも30MHz程度までは十分妥当な近似となるが、通信機が商用電源で駆動される場合、電源線や接地線のインダクティブな影響が無視できないため、数メガヘルツ以上では誤差が大きくなってしまふと予想される。さらに、電源線や接地線経由のノイズの伝搬(いわゆる伝導ノイズ)において、それらのインダクティブな振る舞いは中

心的な役割を果たすため、これを正確に考慮することはノイズ対策の上でも必須である。

そこで、本研究では、これまでに提案してきた等価回路を、通信周波数帯域における電源線や接地線のインダクティブな影響を反映できるように拡張することを目的とする。具体的には、以下の3点について検討する。

- (1) 実測による信号伝達特性の統計的モデリング
- (2) 回路シミュレーションおよび実測による伝導ノイズ発生メカニズムの解明
- (3) 電磁界理論に基づく新たな回路モデリング手法の開発

本研究の最終目標は(3)であるが、これが工学的に有用であるためには、実際に問題となっている現象を的確にモデル化できていなければならない。そこで、(1)、(2)で実測ベースの検討を行い、それにより確認された種々の現象をモデル化できる手法を(3)で開発する。これらに関する詳細は、次節にて述べる。

3. 研究の方法

- (1) 実測による信号伝送特性の統計モデル化

これまで、研究代表者はウェアラブル通信機間の信号伝送特性の接地条件に対する依存性をシミュレーションベースで検討してきた。しかしながら、通信機の接地条件が信号伝送特性に与える影響を評価する場合、ベクトルネットワークアナライザ等を用いるとアンテナが常に接地されてしまうため、この目的には適さない。そこで、本研究では図2に示すウェアラブル通信機のプロトタイプを作成した。このプロトタイプでは、送受信回路とアンテナが一体になっており、両者ともバッテリーで駆動される。したがって、このまま使用すれば非接地状態となり、回路グラウンドを導線で大地に接続すれば、接地状態を実現できる。

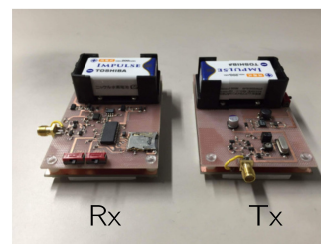


図2 ウェアラブル通信機のプロトタイプ

送信機(Tx)は10MHzの連続正弦波を送信するものである。一方、受信機(Rx)は10MHzの信号を検波し、デシベルスケールの直流電圧に変換した後、これをAD変換器で読み取り、時系列でSDカード上に保存するようにしてある。このデータをオフラインで統計処理することで、受信電圧の確率密度分布を得ることができる。

(2) 回路シミュレーションおよび実測による伝導ノイズ発生メカニズムの解明

一般的に、伝導ノイズ電流には2本の導線に逆相で流れるディファレンシャルモード電流と2本の導線に同相で流れ、グラウンドで帰還するコモンモード電流に分けられるとされている。そして、電源回路や電源タップに備え付けられるノイズフィルタは、これらの電流を抑制するように設計されている。しかしながら、研究代表者の過去の検討から、このようなフィルタを用いても、人体通信機器の動作特性が改善しない場合があることが分かっている。この理由としては、2本の電力線と1本の接地線全てに同相で流れるモード、いわば「3線コモンモード」が存在するためと予想できる。そこで、本研究では、回路シミュレーションと実測の両面から、この予想の妥当性を検証した。

回路シミュレーションでは、図3のように、3線ケーブルを3つのインダクタからなる相互誘導回路としてモデル化した。そして、ブリッジダイオードによる整流回路とフライバックコンバータによる降圧回路からなるAC/DCコンバータによって励起される3線コモンモード電流を計算した。

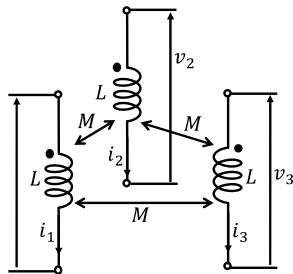


図3 3線ケーブルの等価回路モデル

一方、実測では、一般的な伝導ノイズ試験に使われる LISN(電源インピーダンス安定化回路網)を3線コモンモード測定用に拡張し、フライバックコンバータの実機も試作して回路シミュレーションと同様の条件で3線コモンモードの測定を行なった。

(3) 電磁界理論に基づく新たな回路モデリング手法の開発

前述の通り、研究代表者が過去に提案してきた人体通信の等価回路モデルでは導線のインダクティブな効果は表現できない。したがって、これをどう取り込んで等価回路に落とし込んでいくかが鍵となる。過去のモデルは導体の電位と電荷分布について成立する積分方程式を、モーメント法で解くことで導体間の静電容量を求めていたが、本研究では発想を変え、導体上の電流を展開する基底関数間の自己・相互インピーダンスを等価回路で表現するアプローチを採用した。具体的には、

周波数に依存しない任意の基底関数間の自己・相互インピーダンスを周波数に関してローラン展開した一般表示式を導いた。また、各幕の表示式を各種ベクトル公式に基づいて変形し、キャパシタンス、インダクタンス、微小ダイポールの放射抵抗などの表示式に帰着させた。

4. 研究成果

(1) 実測による信号伝達特性の統計的モデリング

図4に、受信電圧の確率密度分布の一例を示す。ただし、“No GND”は送受信機ともに非接地の場合、“GND Rx”は受信機のみ接地した場合、“GND Tx”は送信機のみ接地した場合、“GND Tx & Rx”は送受信機ともに接地した場合の結果である。また、実線で示しているのが実測値であり、破線で示しているのは、複数の正規分布(multiple normal distribution: MND)の重ね合わせで表現した数式モデルである。モデルのパラメータは、実測値との誤差の二乗積分値が最小になるように決定している。図4から見て取れるように、複数の正規分布を組み合わせることで、複雑な確率密度分布をモデル化できることが分かった。

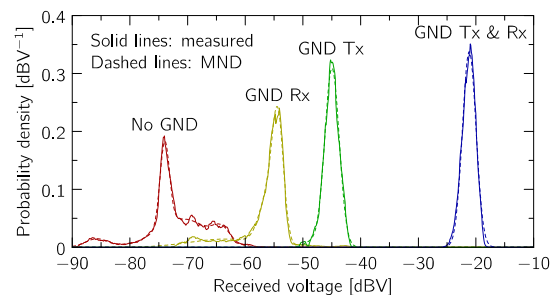


図4 受信電圧の確率密度分布

上記の結果に関する詳細は、雑誌論文 [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [132], [133], [134], [135], [136], [137], [138], [139], [140], [141], [142], [143], [144], [145], [146], [147], [148], [149], [150], [151], [152], [153], [154], [155], [156], [157], [158], [159], [160], [161], [162], [163], [164], [165], [166], [167], [168], [169], [170], [171], [172], [173], [174], [175], [176], [177], [178], [179], [180], [181], [182], [183], [184], [185], [186], [187], [188], [189], [190], [191], [192], [193], [194], [195], [196], [197], [198], [199], [200], [201], [202], [203], [204], [205], [206], [207], [208], [209], [210], [211], [212], [213], [214], [215], [216], [217], [218], [219], [220], [221], [222], [223], [224], [225], [226], [227], [228], [229], [230], [231], [232], [233], [234], [235], [236], [237], [238], [239], [240], [241], [242], [243], [244], [245], [246], [247], [248], [249], [250], [251], [252], [253], [254], [255], [256], [257], [258], [259], [260], [261], [262], [263], [264], [265], [266], [267], [268], [269], [270], [271], [272], [273], [274], [275], [276], [277], [278], [279], [280], [281], [282], [283], [284], [285], [286], [287], [288], [289], [290], [291], [292], [293], [294], [295], [296], [297], [298], [299], [300], [301], [302], [303], [304], [305], [306], [307], [308], [309], [310], [311], [312], [313], [314], [315], [316], [317], [318], [319], [320], [321], [322], [323], [324], [325], [326], [327], [328], [329], [330], [331], [332], [333], [334], [335], [336], [337], [338], [339], [340], [341], [342], [343], [344], [345], [346], [347], [348], [349], [350], [351], [352], [353], [354], [355], [356], [357], [358], [359], [360], [361], [362], [363], [364], [365], [366], [367], [368], [369], [370], [371], [372], [373], [374], [375], [376], [377], [378], [379], [380], [381], [382], [383], [384], [385], [386], [387], [388], [389], [390], [391], [392], [393], [394], [395], [396], [397], [398], [399], [400], [401], [402], [403], [404], [405], [406], [407], [408], [409], [410], [411], [412], [413], [414], [415], [416], [417], [418], [419], [420], [421], [422], [423], [424], [425], [426], [427], [428], [429], [430], [431], [432], [433], [434], [435], [436], [437], [438], [439], [440], [441], [442], [443], [444], [445], [446], [447], [448], [449], [450], [451], [452], [453], [454], [455], [456], [457], [458], [459], [460], [461], [462], [463], [464], [465], [466], [467], [468], [469], [470], [471], [472], [473], [474], [475], [476], [477], [478], [479], [480], [481], [482], [483], [484], [485], [486], [487], [488], [489], [490], [491], [492], [493], [494], [495], [496], [497], [498], [499], [500], [501], [502], [503], [504], [505], [506], [507], [508], [509], [510], [511], [512], [513], [514], [515], [516], [517], [518], [519], [520], [521], [522], [523], [524], [525], [526], [527], [528], [529], [530], [531], [532], [533], [534], [535], [536], [537], [538], [539], [540], [541], [542], [543], [544], [545], [546], [547], [548], [549], [550], [551], [552], [553], [554], [555], [556], [557], [558], [559], [560], [561], [562], [563], [564], [565], [566], [567], [568], [569], [570], [571], [572], [573], [574], [575], [576], [577], [578], [579], [580], [581], [582], [583], [584], [585], [586], [587], [588], [589], [590], [591], [592], [593], [594], [595], [596], [597], [598], [599], [600], [601], [602], [603], [604], [605], [606], [607], [608], [609], [610], [611], [612], [613], [614], [615], [616], [617], [618], [619], [620], [621], [622], [623], [624], [625], [626], [627], [628], [629], [630], [631], [632], [633], [634], [635], [636], [637], [638], [639], [640], [641], [642], [643], [644], [645], [646], [647], [648], [649], [650], [651], [652], [653], [654], [655], [656], [657], [658], [659], [660], [661], [662], [663], [664], [665], [666], [667], [668], [669], [670], [671], [672], [673], [674], [675], [676], [677], [678], [679], [680], [681], [682], [683], [684], [685], [686], [687], [688], [689], [690], [691], [692], [693], [694], [695], [696], [697], [698], [699], [700], [701], [702], [703], [704], [705], [706], [707], [708], [709], [710], [711], [712], [713], [714], [715], [716], [717], [718], [719], [720], [721], [722], [723], [724], [725], [726], [727], [728], [729], [730], [731], [732], [733], [734], [735], [736], [737], [738], [739], [740], [741], [742], [743], [744], [745], [746], [747], [748], [749], [750], [751], [752], [753], [754], [755], [756], [757], [758], [759], [760], [761], [762], [763], [764], [765], [766], [767], [768], [769], [770], [771], [772], [773], [774], [775], [776], [777], [778], [779], [780], [781], [782], [783], [784], [785], [786], [787], [788], [789], [790], [791], [792], [793], [794], [795], [796], [797], [798], [799], [800], [801], [802], [803], [804], [805], [806], [807], [808], [809], [810], [811], [812], [813], [814], [815], [816], [817], [818], [819], [820], [821], [822], [823], [824], [825], [826], [827], [828], [829], [830], [831], [832], [833], [834], [835], [836], [837], [838], [839], [840], [841], [842], [843], [844], [845], [846], [847], [848], [849], [850], [851], [852], [853], [854], [855], [856], [857], [858], [859], [860], [861], [862], [863], [864], [865], [866], [867], [868], [869], [870], [871], [872], [873], [874], [875], [876], [877], [878], [879], [880], [881], [882], [883], [884], [885], [886], [887], [888], [889], [890], [891], [892], [893], [894], [895], [896], [897], [898], [899], [900], [901], [902], [903], [904], [905], [906], [907], [908], [909], [910], [911], [912], [913], [914], [915], [916], [917], [918], [919], [920], [921], [922], [923], [924], [925], [926], [927], [928], [929], [930], [931], [932], [933], [934], [935], [936], [937], [938], [939], [940], [941], [942], [943], [944], [945], [946], [947], [948], [949], [950], [951], [952], [953], [954], [955], [956], [957], [958], [959], [960], [961], [962], [963], [964], [965], [966], [967], [968], [969], [970], [971], [972], [973], [974], [975], [976], [977], [978], [979], [980], [981], [982], [983], [984], [985], [986], [987], [988], [989], [990], [991], [992], [993], [994], [995], [996], [997], [998], [999], [1000]

(2) 回路シミュレーションおよび実測による伝導ノイズ発生メカニズムの解明

図5に、シールドルーム内で測定した3線コモンモード電流の測定値を示す。また、比較のために、図6には2線コモンモード電流(従来から定義されているコモンモード電流)の測定値を示す。これらの結果より、3線コモンモード電流は2線コモンモード電流とは異なる周波数特性を有し、その大きさも決して無視できるものではないことがわかる。また、3線コモンモード電流の大きさは、フライバックコンバータ筐体とシールドルームの床の間隔を変えると変化することを確認している。これは、3線コモンモード電流が周囲環境から影響を受けやすく、同時に周囲環境に影響を与えやすいことを示している。

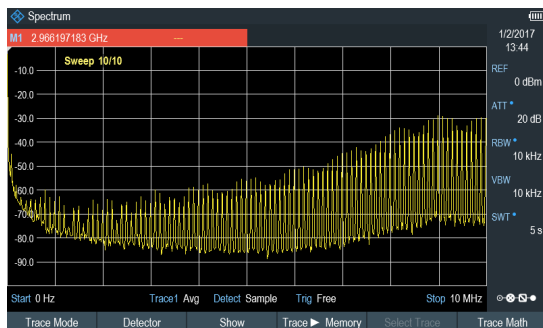


図5 3線コモンモード電流の測定値

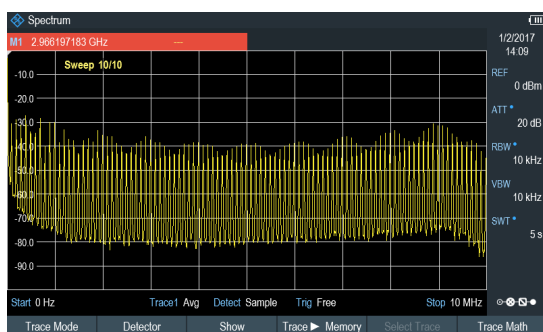


図6 2線コモンモード電流の測定値

上記の結果に関する詳細は，学会発表にて述べている．

(3) 電磁界理論に基づく新たな回路モデリング手法の開発

本研究では，モーメント法における自己・相互インピーダンスの複素角周波数 s に関するローラン級数展開表示式を，周波数に依存しない任意の基底関数に対する一般表現として導出し，これをインピーダンス展開法と名付けた．また， s^{-1}, s, s^2 に比例する項が，それぞれキャパシタ及びインダクタのインピーダンス，微小ダイポールの放射抵抗に相当することを示した．また，インピーダンス展開法は，回路モデリング手法の一つとして従来から知られている PEEC 法よりも高精度であり，線状アンテナの古典的解析手法である起電力法と同等の精度が得られることを確認した．

上記の結果に関する詳細は，学会発表にて述べている．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件，全て査読有)

N. Haga, Y. Kasahara, and K. Motojima, "Statistical modeling of intrabody communication channels in various grounding conditions," *IEICE Commun. Express*, vol.6, no.6, June 2017.

DOI: 10.1587/comex.2016SPL0035

N. Haga, Y. Kasahara, and K. Motojima, "Dynamic measurements of intrabody communication channels and their dependences on grounding conditions," *IEICE Trans.*

Commun., vol.E99-B, no.6, pp.1380–1385, June 2016.

DOI: 10.1587/transcom.2015EBP3497

N. Haga, K. Motojima, M. Shinagawa, and Y. Kado, "Equivalent-circuit expression of environmental noise electric fields in intrabody communication channels," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol.58, no.1, pp.294–306, Feb. 2016. 294–306, Feb. 2016.

DOI: 10.1109/TEMC.2015.2506823

N. Haga, K. Motojima, M. Shinagawa, and Y. Kado, "A note on signal paths in intrabody communication channels," *IEICE Electron. Express*, vol.12, no.12, pp.20150402, June 2015.

DOI: 10.1587/elex.12.20150402

〔学会発表〕(計8件)

羽賀望, 高橋応明, "インピーダンス展開法により得られた等価回路の受動素子近似," 無線電力伝送研究会, 2017年7月27日, 機械振興会館(東京都・港区)

羽賀望, 高橋応明, "自己・相互インピーダンスのローラン級数展開に基づく電氣的超小形デバイスの回路モデリング," 無線電力伝送研究会, 2017年7月27日, 機械振興会館(東京都・港区)

N. Haga, Y. Kasahara, and K. Motojima, "Statistical model of intrabody communication channels," *Int. Conf. Technol. Social Sci.* 2017, 2017年5月10日, 桐生市市民文化会館(群馬県・桐生市)

N. Haga, "Equivalent-circuit modeling of electrically-very-small wireless systems," *Int. Conf. Technol. Social Sci.* 2017, 2017年5月10日, 桐生市市民文化会館(群馬県・桐生市)

N. Haga, Y. Kasahara, and K. Motojima, "Dynamic characteristics of intrabody communication channels," *2016 Int. Symp. Antennas Propag.*, 2016年10月28日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県・宜野湾市)

羽賀俊哉, 羽賀望, 本島邦行, "スイッチング電源によって3線ACケーブルに生じる電流のモード解析," 環境電磁工学研究会, 2015年11月13日, 三菱電機情報技術総合研究所(神奈川県・鎌倉市)

羽賀望, 本島邦行, 品川満, 門勇一, "人体通信チャネルの信号経路," 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015年9月9日, 東北大学(宮城県・仙台市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

羽賀 望 (HAGA Nozomi)

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号: 50638476