

无线通信研究的一个新热点——索引调制技术

冯胜

5G 无线通信期望带来更高的频谱效率和能量效率，为了达到这些目标，已经提出了各种新技术。其中，最近提出的索引调制 IM (Index Modulation) 技术引起了人们的极大兴趣。

IM 不是通过直接改变信号波形来传递信息，而是通过选择不同的索引序号来传递信息。索引资源可以是物理的（例如，天线，子载波，时隙，频率载波和扩频码），也可以是虚拟的（例如，虚拟并行信道，信号星座，空时矩阵和天线激活顺序）。

基本原理

现有的 IM 方案主要在空间，时间，频域和码域或它们之间的相互组合中进行。IM 将要传递的信息比特分成 p_1 （索引比特）和 p_2 （调制比特）两部分，其中， p_1 用于选择索引——确定索引资源中（天线，子载波，扩频码等）的哪些被激活，即完成信息比特到索引之间的映射； p_2 经传统调制（例如 BPSK、QPSK 等）映射为调制符号。

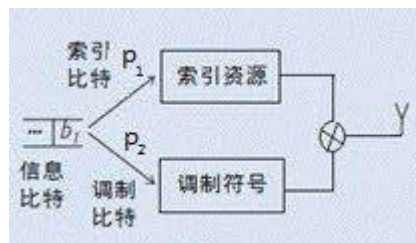


图 1 索引调制示意图

空域索引调制

SM (spatial modulation) 是空间域中的代表性 IM 技术，如图 2 所示，空间调制的索引资源是天线索引，其中 X 代表的是调制符号，蓝色部分代表的是当前激活的天线。SM 由于每个传输时隙只有一根天线被激活用来传输信号，而其他天线保持静默，因此它与单个 RF 链一起工作，通过天线索引传递信息。

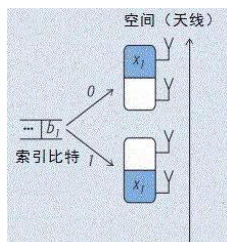


图 2 空域索引调制示意图

空时索引调制

在 MIMO 系统的发射分集中，重点是设计空时矩阵，以获得最大的编码和分集增益。而空时索引调制则是考虑如何利用空时资源传输信息。

差分 SM 是空时索引调制的代表，如图 3 所示。在空时索引调制中，一部分信息比特按预先设定的扩散矩阵被映射为“空时块 (space-time block)”。空时索引调制的索引资源依然是天线索引，但跨多个时隙发送信号，根据“空时块”和索引比特确定天线激活顺序。作为 SM 的差分解决方案，差分 SM 可以避免信道估计。研究表明，与 SM 相比，差分 SM 的性能损失不超过 3dB。

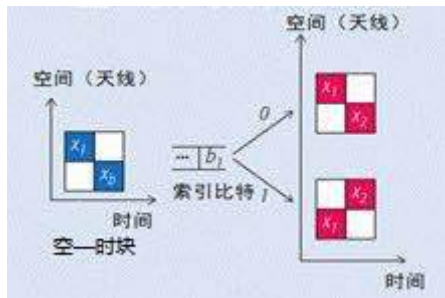


图 3 差分 SM 示意图

频域索引调制

频域索引调制是以频率索引为调制资源。IM-OFDM 是频域中的代表性 IM 技术，它是将 SM 原理扩展到 OFDM 子载波，如图 4 所示。它的索引资源是子载波，在 IM-OFDM 中，在频域引入索引调制以及子载波块的概念，以一个子载波块为调制单位，由索引信息比特激活其中一部分子载波，其基本原理可以看作是空间调制技术在频域的变体。迄今为止，已有多项研究表明，IM-OFDM 在相同频谱效率下的误码率 (BER) 性能胜过传统 OFDM。

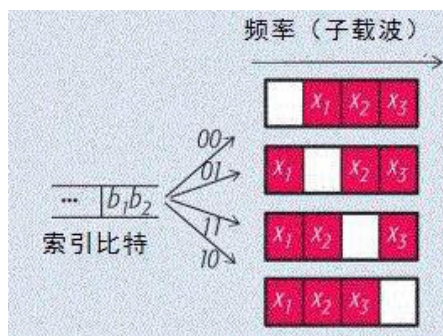


图 4 频率索引调制示意图

空频索引调制

空频索引调制是天线索引和频率索引的结合，或者说，是 SM 和 OFDM 的结合，更一般地，其实是在 MIMO-OFDM 的基础上，引入天线索引，即 MIMO-OFDM-IM。

MIMO-OFDM-IM 会很复杂，特别是在接收端。最近提出广义空频索引调制（GSFIM），降低了复杂度，如图 5 所示。广义空频索引编码器输出的天线索引比特用于天线选择——从 n_t 个天线中选择 n_{rf} 个天线，另一路输出则包含频率索引比特和 M-ary 调制比特。

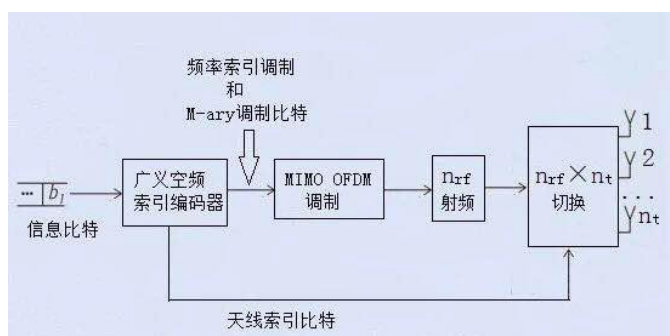


图 5 广义空频索引调制示意图

码域索引调制

CIM (Code Index Modulation) 是码域中很有代表性的 IM 技术，它是将空间调制中的天线索引变为扩频码的索引，如图 6 所示。与 SM、IM-OFDM 相比，CIM 将索引设计挑战转移至设计采用良好特性的扩频码，使系统设计更加主动与可控；同时可通过调整映射扩频码个数来调节传输速率，也节约了物理链路尤其是射频链路消耗；此外，还保留了扩频系统自身良好的抗干扰和抗多径能力，进一步提升了系统的鲁棒性。

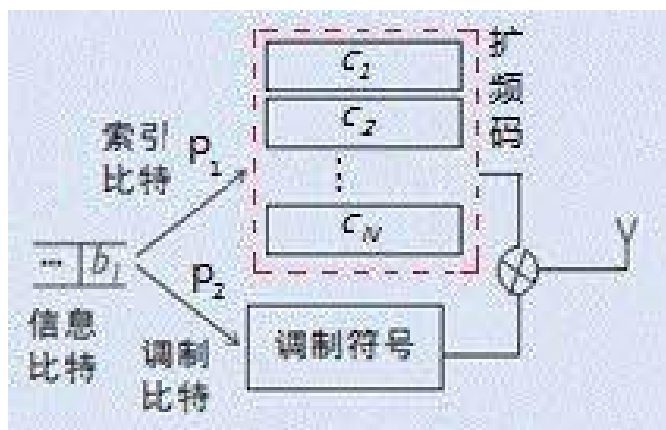


图 6 码索引调制示意图

空码索引调制

SCIM (Space Code Index Modulation) 是将空域和码域结合起来的一种索引调制技术，它将空域中的天线和码域中的扩频码结合在一块，索引资源是天线和扩频码。信息比特在发射端经串并转换后分别映射为扩频码的索引和天线的索引，然后将激活的扩频码调制的信号通过激活的天线发射出去。空码索引调制如图 7 所示，天线和扩频码的结合相比一维的索引调制节省了大量的索引资源。

目前类似于这种二维索引调制的研究还比较少，本文作者所在项目组近年来一直专注空码索引调制技术研究。

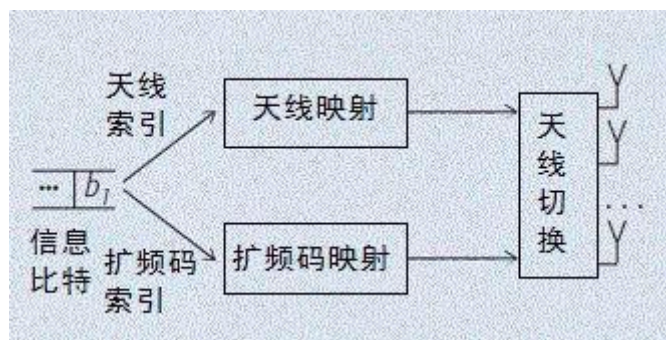


图 7 空码索引调制

展望

本文针对当前索引调制技术已有的研究成果，从不同索引方式以及索引调制的应用，分别简要概述了各种索引调制的基本原理，以及索引调制应用在哪些方面。

IM 在各种通信场景中的实现也是一个热门话题。5G 通信系统有望适应多种新兴通信技术，如大规模 MIMO，协作网络和全双工无线电，

以及支持高移动性场景等挑战性环境中的服务质量要求。针对 5G 应用的 IM 需要“量身定制”，并进行广泛的理论研究。

除了 5G 场景中的 IM 设计之外，对潜在应用和其他新兴场景（如无线供电通信系统，同步无线信息和功率传输以及非正交多址接入）的研究也是一大挑战。

参考文献

- [1] Cheng X, Zhang M, Wen M, et al. Index Modulation for 5G: Striving to Do More with Less[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 25(2):126-132.
- [2] Basar E. Index modulation techniques for 5G wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(7):168-175.
- [3] Sugiura S, Ishihara T, Nakao M. State-of-the-Art Design of Index Modulation in the Space, Time, and Frequency Domains: Benefits and Fundamental Limitations[J]. IEEE Access, 2017, PP(99):1-1.
- [4] Basar E, Wen M, Mesleh R, et al. Index Modulation Techniques for Next-Generation Wireless Networks[J]. IEEE Access, 2017, 5(99):16693-16746.
- [5] 邢峰英，直接序列扩频通信码索引调制技术研究，重庆邮电大学硕士论文，2017.03
- [6] 江治林，基于直接序列扩频的码索引调制方案研究，重庆邮电大学硕士论文，2018.03

本文作者：冯胜，重庆邮电大学在读硕士研究生，研究方向：高速无线传输理论与技术

版权所有：临菲信息技术港，欢迎转载

附：IEEE J-STSP 索引调制专辑 征文（摘录）

Call For Papers—IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing
Special Issue

INDEX MODULATION FOR FUTURE WIRELESS NETWORKS:

A SIGNAL PROCESSING PERSPECTIVE

The topics of interest include, but are not limited to the following:

- Novel signal processing techniques and algorithms for IM-based systems
- Signal processing theories for new spectrum opportunities with IM techniques: massive MIMO, millimeter wave, full-duplex transmission and license assisted access
- Design of generalized/enhanced/quadrature/coded/differential IM systems
- Novel single/multi-carrier IM systems
- Practical implementation and performance analysis of IM systems
- Application of IM systems for multi-user and cooperative communication systems
- IM techniques for optical wireless communications
- Reconfigurable antenna based IM (media-based modulation) schemes
- IM-based non-orthogonal multiple access, energy harvesting, and cognitive radio schemes.

Manuscript submission: December 1, 2018

1st review completed: February 1, 2019

Revised manuscript due: April 1, 2019

2nd review completed: June 1, 2019

Final manuscript due: July 1, 2019

Publication: October 2019

(本文原载：微信公众号：临菲信息技术港)

