

文章编号: 2095-4980(2018)03-0565-06

低温漂高 PSRR 的二阶补偿带隙基准源设计

崔晶晶, 曾以成, 夏俊雅

(湘潭大学 微电子科学与工程系, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 设计了一种线性补偿低温漂高电源抑制比带隙基准电压源电路。带隙基准核心电路采用三支路共源共栅电流镜结构, 提高电路电源抑制比。补偿电路采用分段补偿原理, 在低温阶段, 加入一段负温度系数电流, 在高温阶段, 加入一段正温度系数电流, 通过补偿, 使带隙基准输出电压的精确度大大提高, 达到降低温度系数的目的; 同时电流镜采用共源共栅结构, 不仅提高电路的电源抑制比, 而且可以抑制负载对镜像晶体管电压的影响。基于 0.5 μm CMOS 工艺, 使用 Cadence Spectre 对电路仿真, 结果表明, 在 $-50\sim+125^\circ\text{C}$ 温度范围内, 基准输出电压的温度系数为 $2.62\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 低频时的电源抑制比(PSRR)高达 88 dB。

关键词: 带隙基准; 分段线性补偿; 温度系数; 电源抑制比(PSRR); 共源共栅

中图分类号: TN432

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0565

Design of a low temperature drift and high PSRR bandgap reference source with second-order compensation

CUI Jingjing, ZENG Yicheng, XIA Junya

(Department of Microelectronics Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

Abstract: A bandgap voltage reference source circuit with piecewise-linear compensation is designed. It has the functions of a low temperature drift and a high power supply rejection ratio. The bandgap reference core circuit adopts the structure of three branches and cascode current mirror, which improves the rejection ratio of the power supply for circuit. According to the piecewise-linear compensation principle, the circuit adds a negative temperature coefficient current when the temperature is low. Similarly, the circuit adds a positive temperature coefficient current when the temperature is high. This kind of compensation circuit greatly improves the accuracy of output voltage for bandgap reference and it achieves the goal of reducing the temperature coefficient. In addition, the current mirror adopts the cascode structure, it not only improves the rejection ratio of power supply for circuit, but also suppresses the load effect on the mirror transistor voltage. Basing on 0.5 μm standard of CMOS technology, the circuit is simulated by Cadence Spectre software. The result shows that the temperature coefficient of reference output voltage is $2.62\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ when the temperature ranges from -50°C to $+125^\circ\text{C}$, and the Power Supply Rejection Ratio(PSRR) reaches 88 dB when the circuit is under low frequency condition.

Keywords: bandgap reference; piecewise-linear compensation; temperature coefficient; Power Supply Rejection Ratio(PSRR); cascode

基准电压源广泛应用于各种电路系统中, 具有高精确度、低温漂、高电源抑制比等特点, 是集成电路中的重要模块^[1]。基准电压源各种性能的好坏直接影响电路其他模块甚至系统的稳定性和精确度, 传统一阶温度补偿带隙基准源电路, 其温度系数^[2]一般为 $(2\sim 5)\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 已经不能满足当前高速发展集成电路的要求, 需要进行高阶补偿以提高带隙基准源的各种性能^[3]。在各种性能研究中温度系数和电源抑制比, 是带隙基准的一大关键性指标。常用的主要温度补偿技术有: 不同温度系数电阻补偿、分段补偿、指数曲率补偿等^[4]。考虑到: 1) 电阻随温度变化非线性, 受工艺影响较大, 这需要对工艺提出特别的要求, 所以一般情况下用不同温度系数电阻补偿的方法工艺稳定性较差; 2) 指数曲率补偿的方法需要利用晶体管电流增益, 由于增益是温度的函数, 电路

收稿日期: 2017-01-03; 修回日期: 2017-03-01

稳定性变差，而且版图面积也较大。因此本文决定采用分段补偿的方法对带隙基准源进行温度补偿。大部分带隙基准分段补偿电路通常采用含有运放的电路结构，这种电路不但结构复杂，而且实际测试时由于运放的失调电压会对电路造成一定影响^[5]。文献[6]虽是一种无运放结构的带隙基准电压源，消除了运放对其的影响，但是电路温度系数大，电源电压抑制比较低；文献[7]的高阶温度补偿电路虽然不含运放，但是电路仅在高温阶段进行补偿，使得电路温度系数较大，且电源抑制比低。

基于上述分析，设计一种新型低温漂高电源抑制比的分段线性补偿带隙基准源，利用不同温度系数电流进行减法运算得到补偿电流，通过分段线性补偿，在低温阶段加入负温度系数电流，高温阶段加入正温度系数电流，使带隙基准源温度系数降低，同时电路采用共源共栅电流镜，不仅可以提高电路电源抑制比，而且可以减小负载对电路的影响。

1 带隙基准电路结构设计

传统带隙基准源，一般情况下只进行了一阶补偿，本文设计的分段线性补偿是在一阶补偿的基础上，将温度分为 3 个阶段，利用温度系数不同的电流做减法运算，在低温时进行负温度系数电流补偿，在高温时进行正温度系数电流补偿，中间温度段不补偿。电路补偿原理如图 1 所示。

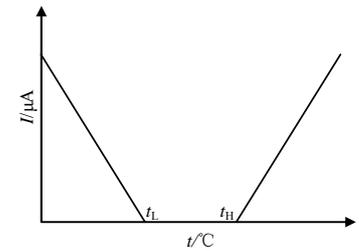


Fig.1 Compensated principle of the circuit
图 1 电路补偿原理

本文所设计的分段线性补偿带隙基准源电路如图 2 所示。在一阶补偿带隙基准源基础上进行分段线性补偿，其电路主要包括：正负温度系数电流源电路、三支路共源共栅带隙基准核心电路、低温阶段线性补偿电路、高温阶段线性补偿电路。

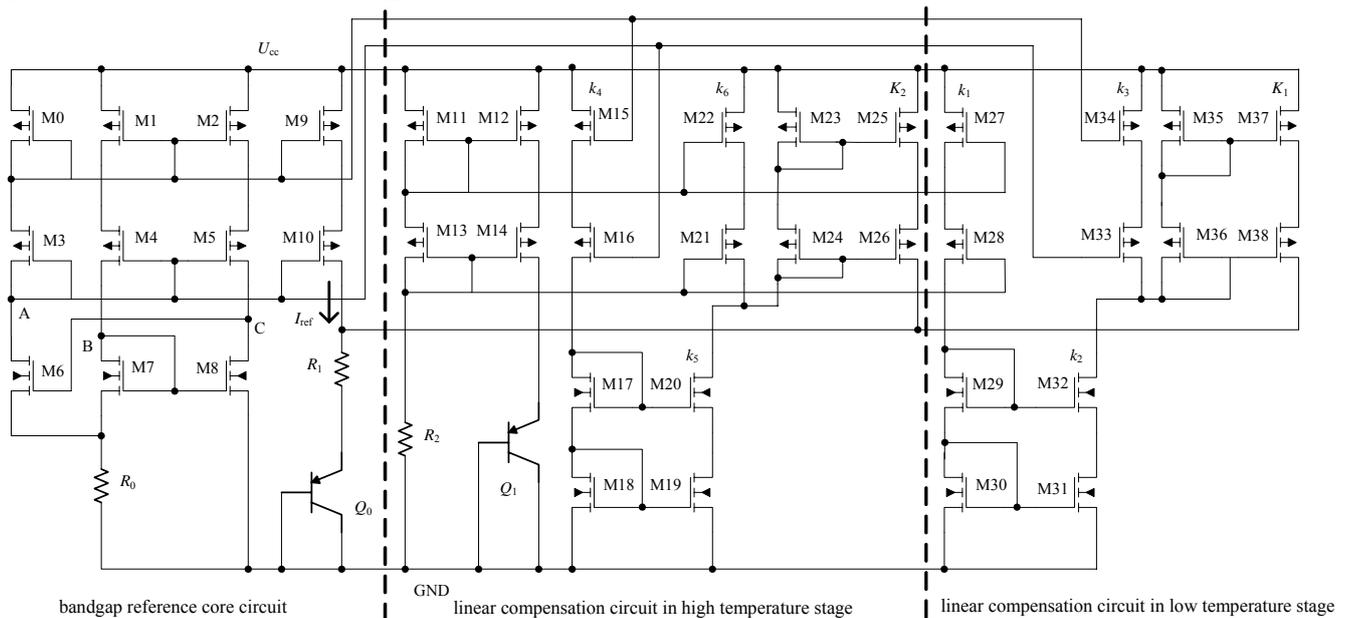


Fig.2 Bandgap reference circuit diagram of the proposed piecewise-linear compensation
图 2 本文提出的分段线性补偿带隙基准源电路图

1.1 电流源电路

本文设计的电流镜电路采用共源共栅结构，不仅可以提高电路电源电压抑制比，而且可以减小因为负载接入使镜像管漏极电压可能不等于被镜像管漏极电压的影响，从而提高镜像电流准确度。

M0~M8, R₀ 构成与绝对温度成正比(Proportional To Absolute Temperature, PTAT) 的电流源电路，使 M7 和 M8 工作在亚阈值区，亚阈值区 MOS 管源漏极电流大小为^[8]：

$$I_{PTAT} = \frac{\zeta U_T \ln K}{R_0} \tag{1}$$

式中：ζ 是亚阈值斜率因子； $U_T = kT/q$ 。

M11~M14, R₂, Q₁ 构成与绝对温度互补(Complementary To Absolute Temperature, CTAT)的电流源电路，M11~M14 为共源共栅结构的电流镜，可以得到流过 M11, M13 管的电流为负温度系数电流，其表达式为：

$$I_{CTAT} = \frac{U_{BE1}}{R_2} \quad (2)$$

式中 U_{BE1} 为晶体三极管 Q_1 的基极-发射极的电压。

1.2 低温阶段补偿电路

低温阶段补偿电路由图 2 中 MOS 管 M27~M38 构成，主要由共源共栅电流镜组成。通过 M27,M28 镜像 I_{CTAT} 电流，则流过 M27,M28 的电流为 $k_1 I_{CTAT}$ ；之后通过 M29~M32 构成的共源共栅电流镜，得到流过 M32,M31 管的电流大小为 $k_1 k_2 I_{CTAT}$ ；由 M33,M34 与 M3,M4 组成的电流镜得到流过 M34,M33 管的电流大小为 $k_3 I_{PTAT}$ 。在低温阶段的节点处，负温度系数电流大于正温度系数电流，根据基尔霍夫定律，流过 M37,M38 的电流 I_{NL} 为：

$$I_{NL} = \begin{cases} K_1(k_1 k_2 I_{CTAT} - k_3 I_{PTAT}), & I_{CTAT} > I_{PTAT} \\ 0, & I_{CTAT} \leq I_{PTAT} \end{cases} \quad (3)$$

式中： K_1 为 M37,M38 与 M35,M36 的宽长比之比； k_1 为 M27,M28 与 M11,M13 的宽长比之比； k_2 为 M32,M31 与 M29,M30 的宽长比之比； k_3 为 M34,M33 与 M0,M3 的宽长比之比。

1.3 高温阶段补偿电路

高温阶段补偿电路由图 2 中 MOS 管 M15~M26 构成，高温阶段补偿原理和低温阶段温度补偿原理相同。M15,M16 与 M0,M3 构成共源共栅电流镜，流过 M15,M16 的电流 $k_4 I_{PTAT}$ 通过共源共栅电流镜 M17~M20，镜像过来电流大小为 $k_4 k_5 I_{PTAT}$ ；M22,M21 与 M11,M13 构成电流镜，镜像的负温度系数电流为 $k_6 I_{CTAT}$ 。在高温阶段，正温度系数电流大于负温度系数电流，在节点处根据 KCL 定理，流过 M25,M26 的电流 I_{PH} 为：

$$I_{PH} = \begin{cases} K_2(k_4 k_5 I_{PTAT} - k_6 I_{CTAT}), & I_{PTAT} > I_{CTAT} \\ 0, & I_{PTAT} \leq I_{CTAT} \end{cases} \quad (4)$$

式中： K_2 为 M25,M26 与 M23,M24 的宽长比之比； k_4 为 M15,M16 与 M0,M3 的宽长比之比； k_5 为 M20,M19 与 M17,M18 的宽长比之比； k_6 为 M22,M21 与 M11,M13 的宽长比之比。

1.4 带隙基准源核心电路

带隙基准电压源核心电路^[9-13]如图 2 所示。图 2 中，由 M0~M10, R_0 ~ R_1 , Q_0 构成 PTAT 电流源及电压基准核心电路模块。MOS 管 M3~M8 的电路结构形成了 $U_A \rightarrow U_B \rightarrow U_C \rightarrow U_A$ 负反馈环路，从而提高电路 PSRR，减小电源电压变化对电流源的影响。

低温补偿电流和高温补偿电流接入带隙基准核心电路，使得带隙基准电压在低温段和高温段分别得到补偿，带隙基准电路经过补偿之后的电压为：

$$U_{ref} = (I_{ref} + I_{NL} + I_{PH})R_1 + U_{BE} \quad (5)$$

2 仿真与结果分析

电路基于 0.5 μm CMOS 工艺，利用 Cadence Spectre 对设计电路进行仿真实验验证。在图 3 中，实线为低温阶段线性补偿电流，虚线为高温阶段线性补偿电流。仿真结果显示补偿电流具有良好的稳定性。图 4 所示为基准电压源的电源抑制比仿真曲线。从仿真结果可知，该电路低频段的电源抑制比达到 88 dB，具有较高的抑制电源波动能力。图 5 和图 6 分别是带隙基准电压线性补偿前和补偿后的温度特性仿真结果。

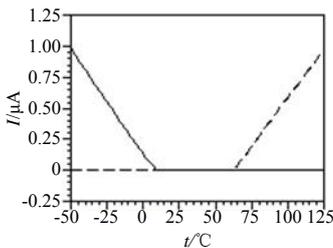


Fig.3 Simulated results of compensating current at the low and high temperature phases
图 3 低温和高温阶段补偿电流仿真结果

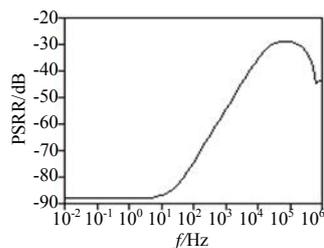


Fig.4 Power supply rejection ratio of bandgap reference source
图 4 带隙基准源的电源抑制比

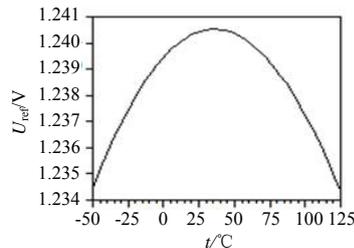


Fig.5 Temperature characteristics of reference voltage before compensation
图 5 补偿前基准电压的温度特性

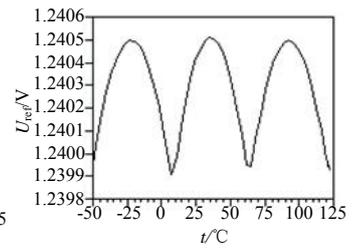


Fig.6 Temperature characteristics of reference voltage after compensation
图 6 补偿后基准电压的温度特性仿真曲线

仿真结果表明,在 $-50\sim+125^{\circ}\text{C}$ 温度范围,未加入补偿电路时,带隙基准的温度系数约为 $28.1\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;加入补偿电路后,基准电压温度系数约为 $2.62\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,补偿之后温度系数精确度约提高 11 倍,补偿效果明显。

表 1 本文与其他文献带隙基准源仿真结果比较

Table 1 Simulated results comparison of bandgap reference sources between proposed and other literatures

parameters	literature [4]	literature [5]	literature [6]	literature [9]	this article
temperature coefficient/ $(10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$	3.02	7.25	25.70	5.00	2.62
temperature range/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	-40-125	-40-125	-40-140	-40-85	-50-125
PSRR/dB	57.00	89.28	80.33	76.00	88.00

3 结论

随电源管理芯片精确度不断提高,在一阶补偿带隙基准电路的基础上,设计了一种分段线性补偿电路,利用在节点处不同温度系数电流进行减法运算,在低温和高温阶段分别加入负温度系数和正温度系数电流,从而抑制温漂,使带隙基准源温度系数降低,同时电流镜采用共源共栅结构,提高电路电源电压抑制比,减小负载接入对电路的影响。仿真结果表明,基准电压的温度系数仅为 $2.62\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,低频时电源抑制比达到 88 dB。

参考文献:

- [1] 李宏杰,冯全源. 一种二阶曲率补偿的低温漂高精度带隙基准设计[J]. 电子元件与材料, 2014,33(12):65-69. (LI Hongjie,FENG Quanyuan. Design of a second-order curvature-compensated band-gap reference with low temperature-drift and high precision[J]. Electronic Components and Materials, 2014,33(12):65-69.)
- [2] 张献中,张涛. 一种三阶曲率补偿带隙基准电压源的设计[J]. 武汉科技大学学报, 2015,38(1):67-71. (ZHANG Xianzhong,ZHANG Tao. A bandgap voltage reference with third-order curvature compensation[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2015,38(1):67-71.)
- [3] 来新泉,郝琦,袁冰,等. 一种二阶曲率补偿的高精度带隙基准电压源[J]. 西安电子科技大学学报, 2010,37(5):911-915,933. (LAI Xinquan,HAO Qi,YUAN Bing,et al. High precision bandgap reference with 2nd order curvature compensation[J]. Journal of Xidian University, 2010,37(5):911-915,933.)
- [4] 张东亮,曾以成,陈星燕,等. 曲率补偿低温漂带隙基准电压源设计[J]. 电子元件与材料, 2015,34(11):85-88. (ZHANG Dongliang,ZENG Yicheng,CHEN Xingyan,et al. Design of a low temperature drift bandgap reference source with curvature compensation[J]. Electronic Components and Materials, 2015,34(11):85-88.)
- [5] 胡勇,彭晓宏,刘云康,等. 一种新型电流模式带隙基准源的设计[J]. 微电子学, 2013,43(4):457-459,463. (HU Yong,PENG Xiaohong,LIU Yunkang,et al. Design of a novel current-mode bandgap reference source[J]. Microelectronics, 2013, 43(4):457-459,463.)
- [6] 姜树法,张国俊. 分段温度曲率补偿双极工艺带隙基准设计[J]. 微电子学与计算机, 2013,30(4):75-78. (JIANG Shufa,ZHANG Guojun. Design of a bandgap reference in bipolar process based on piecewise temperature curvature-correct technology[J]. Microelectronics & Computer, 2013,30(4):75-78.)
- [7] 马亚楠,陈刚,林殷茵. 一种带有新型曲率补偿的带隙基准电压源设计[J]. 复旦学报(自然科学版), 2012,51(6):692-697. (MA Yanan,CHEN Gang,LIN Yinyin. A bandgap reference design with novel curvature compensation[J]. Journal of Fudan University(Natural Science), 2012,51(6):692-697.)
- [8] 何乐年,王忆. 模拟集成电路设计与仿真[M]. 北京:科学出版社, 2008:263-286. (HE Lenian,WANG Yi. Analog integrated circuit design and simulation[M]. Beijing:Science Press, 2008:263-286.)
- [9] 赵国华,高云,鲍钰文. 一种指数曲率补偿 CMOS 带隙基准源的设计[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2013,35(2):160-163,167. (ZHAO Guohua,GAO Yun,PAO Yuwen. Design of a exponential curvature-compensated CMOS bandgap voltage reference[J]. Journal of Hubei University(Natural Science), 2013,35(2):160-163,167.)
- [10] 段杰斌,罗志国,刘孟良,等. 一种用于 LDO 的低功耗带隙基准电压源[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):767-770. (DUAN Jiebin,LUO Zhiguo,LIU Mengliang,et al. A low power bandgap voltage reference for Low Dropout Regulator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):767-770.)
- [11] 杨宁,史仪凯,袁小庆,等. 高精度、低功耗带隙基准源及其电流源设计[J]. 传感技术学报, 2014,27(1):58-63. (YANG Ning,SHI Yikai,YUAN Xiaoqing,et al. Design of high precision bandgap reference and current reference with low power consumption[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014,27(1):58-63.)
- [12] CAO Y,DE COCK W,STEYAERT M,et al. A 4.5 MGy TID-tolerant CMOS bandgap reference circuit using a dynamic base leakage compensation technique[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013,60(4):2819-2824.

- [13] ZHOU Z K, SHI Y, HUANG Z, et al. A 1.6-V 25- μ A 5-ppm/ $^{\circ}$ C curvature-compensated bandgap reference[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(4): 677-684.

作者简介：



崔晶晶(1992-), 女, 河南省商丘市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 LED 驱动电路研究与设计. email: jingjingcui1112@163.com.

曾以成(1962-), 男, 湖南省涟源市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为混沌微弱信号检测、LED 驱动电路研究与设计.

夏俊雅(1992-), 女, 湖北省枣阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 LED 驱动电路研究与设计.

2018《中国通信》科技前沿研讨会暨中国通信学会海外科学家蓝海论坛

云南 大理 2018 年 8 月 2~3 日

本次会议以“5G 及创新应用”为主题, 邀请到中国通信学会和基金委等政府机关领导, 陆建华、于全、尤肖虎、江涛、冯志勇、任奎、盛敏、艾渤等国内知名学者, 方玉光、夏香根、章君山、崔曙光、张伟、王承祥等海外学者, 以及来自华为、中兴、中国信通院、中国联通、阿里巴巴和腾讯的专家共同参与, 解读未来通信的先进技术及应用。

主办单位：中国通信学会

协办单位：云南大理大学、中国通信学会青年工作委员会、中国通信学会新锐论坛、中国电子学会青年科学家俱乐部网络与通信系统专委会

预约报名：会议收取注册费 3000 元/人。考虑到 8 月是大理旅游旺季, 交通拥挤、房源紧张且价格较高, 会务组将为参会代表提供接送机服务, 住宿标准超出部分也由会务组统一与酒店协商解决。



后 5G 时代

目前世界各国企业正积极研究 5G 移动通信,有望在 2020 奥运会之前全面部署。采用这一新兴网络,用户将比目前获得更高频的波段、更多空间复用功能以及更大的容量。

想象室内上千学生正在同时经历一场增强现实的演讲或报告,或者在一辆无人驾驶汽车上,即使在恶劣的天气条件下,也可以实时检测前方几英里发生事故或障碍的情况。这些场景若想成为现实,我们需要增强的一代无线通信。

这就是新成立的“融合太赫兹通信与传感”(ComSenTer)研究中心的重点任务。ComSenTer 是一个 2 750 万美元的项目,中心任务是在加州大学圣芭芭拉分校(UCSB)研究融合太赫兹通信和感测,该项目由 UCSB 的电子和计算机工程学院教授 Mark Rodwell 负责。UCSB 是研究太赫兹通信和感测的主要研究机构。

“我们重点针对下一代通信和感测,这有可能发展为 6G 通信技术”,ComSenTer 副总监、加州理工大学伯克利分校电子工程和计算机科学教授 Ali Niknejad 说。

ComSenTer 的研究将在 5G 的基础上进一步深入,通过采用 100 GHz 到 1 THz 之间的极高频为下一代移动通信打下基础。这将使极度密集的通信系统成为可能,可同时运行成百上千的无线链路,容量为 5G 系统和网络的 10~1000 倍。

“Mark Rodwell 教授将领导这一项目,我们很高兴也很自豪”,UCSB 工程学院院长 Rod Alferness 说,“我们相信推广和应用我们团队在太赫兹和感测技术方面的进展,把带宽很宽的信息、信号传输到成千的用户那里,为应对无线业务不断增长的的未来需求提供了很好的前景”。

ComSenTer 是 2 亿美元、为期 5 年的 Joint University Microelectronics Program(JUMP)项目的一部分。JUMP 是美国企业与国防先进研究计划局(DARPA)的合作研究项目,由半导体研究公司(SRC)负责。将资助以 6 所顶级大学为主体的研究机构:UCSB、卡耐基·梅隆大学、普渡大学、佛吉尼亚大学、密歇根大学以及圣母大学。各研究中心分别负责推动微电子发展的一项挑战技术,微电子是一个对美国经济以及国家防御能力很关键的领域。这 6 个中心将联合寻找有效的解决方案。每个中心都有来自项目承担公司的联系人,协助技术合作及技术转移。JUMP 出资方既来自商界,也来自国防电子企业。

目前,ComSenTer 下设 4 个任务组:1) ComSenTer-T1。该任务组负责研究融合太赫兹网络与传感的系统、算法,解决极高频(太赫兹)的技术难题,要求研发出基于太赫兹频段的大容量通信与成像网络。2) ComSenTer-T2。该任务组负责研发用于融合太赫兹网络与传感系统的毫米波/太赫兹芯片组及阵列,包括基带芯片与射频芯片。要求把芯片的复杂度与功耗做到最小。同时研究可工作于太赫兹频段的“芯片到天线”接口,并解决其散热问题。3) ComSenTer-T3。该任务组负责研发专用晶体管,包括:基于 GaN 和 InP 的高功率晶体管(目标是提高发射功率并改善能量效率),基于 InP 的低噪声晶体管(目标是提高接收机灵敏度)。要研发可工作于 340 GHz,650 GHz, 1080 GHz 的低噪声、高功率 GaN 与 InP 晶体管。4) ComSenTer-T4。该任务组负责对具有极高容量的空间复用太赫兹无线链路以及高精度太赫兹成像系统进行展示。

日本也将开发太赫兹技术列为“国家支柱技术十大重点战略目标”之首,欧盟已将发展太赫兹通信列为了 6G 研究计划;ITU 在 WRC-19 大会专设议题 1.15,以确定运行在 275 GHz 以上频段的陆地移动和固定业务系统的技术与操作特性,包括研究相关频谱需求、建立 0.275~0.475 THz 频段范围内的传播模型、开展业务间电磁兼容分析、确定候选频段等。

近日,我国工业和信息化部副部长苗圩在接受采访时透露:“我们已经开始着手在研究 6G 的发展,也就是第六代移动通信”。

也有人担心虽然 6G 太赫兹技术已经在成像领域广泛应用,但是用于通信中,它的传输距离会比毫米波还要短很多(频率越高,路径损耗越大,接收信号越弱),用作远距离通信不太现实。而且那样高的采样速率,硬件暂时也跟不上。6G 不是单纯的频率搬移,更多的应结合数据分析、数据挖掘、物联网、人工智能等技术,提供一个具有超低延时、高精度定位、超高传输速率、超高带宽,可以支撑不同应用场景的平台。