

УДК № 551.501.8

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СВЧ-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ НЕПРЕРЫВНОГО РЕЖИМА

А. Г. ГОРЕЛИК, С. Ф. КОЛОМИЕЦ, В. И. КРИВОРУЧКО, П. В. КУПРИЯНОВ, С. А. ПЕТРОВ

Рассмотрены основные параметры и схемы построения СВЧ-радиолокационных приемопередатчиков непрерывного режима. Обосновывается целесообразность введения понятия энергетического потенциала. Проведена качественная оценка энергетического потенциала трех вариантов построения СВЧ-приёмопередатчиков непрерывного режима. Обсуждены некоторые особенности их применения в радиометрологии.

Ключевые слова: радиолокационные приемопередатчики непрерывного режима, СВЧ, энергетический потенциал, динамический диапазон.

Введение. В последнее время происходит бурное развитие техники и технологии твердотельных усилителей мощности, малозумящих усилителей, смесителей и т.п. в диапазоне СВЧ. Достигнутый на сегодняшний день твердотельной техникой СВЧ уровень параметров по мощности, чувствительности, долговечности приводит к все более активному ее использованию в аппаратуре радиолокационных приемопередатчиков (РЛПП) самого различного назначения. Среди них несколько особняком стоят РЛПП непрерывного режима – потенциально самые простые и эффективные с точки зрения достижения максимальной дальности действия РЛС.

Данная работа посвящена рассмотрению особенностей РЛПП непрерывного режима, а также некоторым, на взгляд авторов, перспективным аспектам их применения в аппаратуре для радиометеорологических исследований.

Дальность действия и энергетический потенциал. Дальность действия радиолокатора зависит от излучаемой мощности, чувствительности приемника, параметров антенн и выражается формулой:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{прд}} K_{\text{нд}} S_{\text{ант}} \sigma}{(4\pi)^2 P_{\text{прм}}}} \quad (1)$$

где: $P_{\text{прд}}$ - мощность передатчика; $K_{\text{нд}}$ - коэффициент направленного действия антенны; $S_{\text{ант}}$ - эффективная площадь антенны; σ - эффективная площадь рассеяния цели; $P_{\text{прм}}$ - минимальная чувствительность приёмника.

Часть параметров, входящих в уравнение дальности, а именно $K_{\text{нд}}$, $S_{\text{ант}}$ и σ зависят от радиофизических свойств антенны и цели, а $P_{\text{прд}}$ и $P_{\text{прм}}$ – определяются свойствами радиолокационного приемопередатчика. В том случае, когда параметры антенны и цели могут быть зафиксированы, например, в составе измерительного стенда, справедливо выражение:

$$D = \sqrt[4]{\frac{K_{\text{ац}} P_{\text{прд}}}{P_{\text{прм}}}} \quad (2)$$

где: $K_{\text{ац}} = K_{\text{нд}} S_{\text{ант}} \sigma / (4\pi)^2$ – постоянный множитель, отражающий радиофизические свойства антенны и цели.

Отношение $P_{\text{прд}}/P_{\text{прм}}$ иногда называют энергетическим потенциалом РЛС [1]. Термин не вполне устоялся. Его строгое определение в литературе отсутствует. Тем не менее, благодаря понятному физическому смыслу, энергетический потенциал интерпретируется специалистами, наряду с дальностью действия, как одна из важнейших характеристик РЛС [2-4].

Применительно к РЛПП это понятие имеет существенное прикладное значение для сравнительной оценки дальности действия радиолокатора в лабораторных условиях. Особенно в случае невысоких значений энергетического потенциала приемопередатчиков непрерывного режима РЛС ближнего радиуса действия [5].

Для удобства дальнейшего изложения энергетический потенциал РЛПП непрерывного режима представим следующим выражением:

$$П = R_{\text{ПРД}} / R_{\text{ПРМ}} \quad (3)$$

где: $R_{\text{ПРД}}$ – мощность передатчика; $R_{\text{ПРМ}}$ – чувствительность приемника.

При импульсном режиме работы приемопередатчика $П_{\text{имп}}$ зависит от скважности аналогично средней излучаемой мощности в соответствии с выражением:

$$П_{\text{имп}} = П / Q \quad (4)$$

где: Q - скважность.

Из выражения следует, что энергетический потенциал импульсного РЛПП уменьшается пропорционально скважности излучаемого сигнала. Соответственно импульсный режим работы транзисторного приемопередатчика РЛС не является оптимальным с точки зрения предельно достижимого энергетического потенциала. Физические принципы, лежащие в основе современных транзисторов СВЧ, не позволяют рассчитывать на существенное увеличение импульсной мощности, аналогично вакуумным сверхвысокочастотным приборам.

На основе приведенных рассуждений напрашивается вывод о преимуществе непрерывного режима твердотельных радиолокационных приемопередатчиков СВЧ-диапазона. Данный вывод вполне корректен в принципиальном плане. Однако есть технические трудности в реализации предельных, близких к теоретическим, значений радиолокационного потенциала РЛПП непрерывного режима. Они обусловлены двумя факторами, связанными с просачиванием мощности выходного сигнала передатчика на вход приемника:

- мощность несущей зондирующего сигнала превышающая верхнюю границу динамического диапазона приемника, перегружает его по входу;
- амплитудные шумы вблизи несущей зондирующего сигнала, превышающие чувствительность приемника, ограничивают нижнюю границу его динамического диапазона.

Именно по этим двум причинам среди существующих радиолокационных средств средней и большой дальности радиолокация непрерывного режима практически не представлена. Да и в современных прикладных разработках основное место также занимают когерентные импульсно-доплеровские РЛС.

Тем не менее, увеличение энергетического потенциала твердотельных приемопередатчиков непрерывного режима в диапазонах СВЧ по-прежнему актуально. Эта проблема становится в последние годы предметом интереса специалистов в области транспортной, промышленной радиолокации, радиометеорологии и других радиолокационных применений. Причина тому – заманчивая простота твердотельных РЛПП непрерывного режима по сравнению с импульсными.

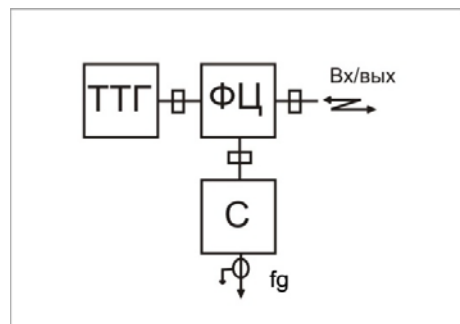


Рис.1 – Структурная схема одноантенного РЛПП8-мм диапазона длин волн (ТТГ – твердотельный генератор; ФЦ – ферритовый циркулятор; С – смеситель).



Рис.2 – Внешний вид РЛПП на основе небалансного смесителя

Существует несколько типов РЛПП непрерывного режима, различающихся уровнем электрических параметров, а, следовательно, схемотехникой и конструктивным исполнением. Условно их можно разбить на две большие группы – одноантенные и двухантенные.

Одноантенные РЛПП. Пример структурной схемы одноантенного приемопередатчика показан на Рис.1. Сигнал твердотельного генератора (ТТГ) через ферритовый циркулятор (ФЦ) поступает на выход. Небольшая его часть через развязку циркулятора и отражение от антенны попадает на вход смесителя (С) в качестве гетеродинного сигнала. Туда же попадает сигнал отраженный от цели. Нелинейно взаимодействуя с гетеродином он преобразуется в доплеровский диапазон частот и поступает на выход смесителя для последующего усиления и обработки. Внешний вид такого модуля, разработанного в 1979 году для применения в промышленности и на транспорте [6] показан на Рис.2.

Чувствительность РЛПП складывается из двух слагаемых: первое определяется амплитудными шумами ТТГ, а второе – шумом по Найквисту:

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{ТТГ}} \gamma_a \Delta f L_{\text{прб}}}{L_{\text{пшг}}} + k T_o \Delta f L_{\text{прб}} = L_{\text{прб}} \left(\frac{P_{\text{ТТГ}} \Delta f \gamma_a}{L_{\text{пшг}}} + k T_o \Delta f \right) \quad (5)$$

где: $P_{\text{прм}}$ – предельная чувствительность; $P_{\text{ТТГ}}$ – мощность ТТГ; $L_{\text{прб}}$ – потери преобразования смесителя; $L_{\text{пшг}}$ – подавление амплитудных шумов гетеродина; γ_a – относительная спектральная плотность мощности амплитудных шумов ТТГ на доплеровской отстройке; Δf – полоса частот анализа; k – постоянная Больцмана; T_o – физическая температура.

Соответственно, выражение для энергетического потенциала рассматриваемого одноантенного РЛПП, построенного по такой упрощенной схеме, приобретает вид:

$$П_1 = \frac{P_{\text{прд}}}{L_{\text{прб}} \Delta f \left(\frac{P_{\text{ТТГ}} \gamma_a}{L_{\text{пшг}}} + k T_o \right)}$$

Корректно допущение, что $P_{\text{прд}} = P_{\text{ТТГ}}$ и $P_{\text{ТТГ}} \gamma_a / L_{\text{пшг}} \gg k T_o$, так как вклад «амплитудных» шумов ТТГ на доплеровских отстройках существенно превышает шум по Найквисту. Тогда аналитическое выражение для энергетического потенциала следует из выражения (3) с учетом (5) как частный случай:

$$П_1 = \frac{L_{\text{пшг}}}{\gamma_a \Delta f L_{\text{прб}}} \quad (6)$$

Особенность выражения (6) состоит в том, что в нее не входит мощность передатчика. Этот, на первый взгляд неожиданный факт, вполне физически обоснован. Мощность амплитудных шумов ТТГ вблизи несущей, определяющая чувствительность приемника в данном случае

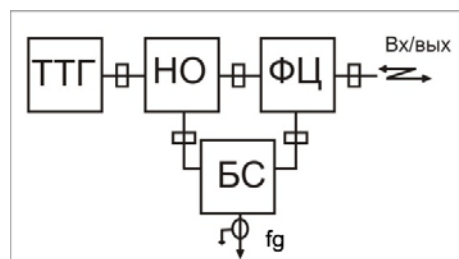


Рис.3 – Структурная схема одноантенного РЛПП на основе балансного смесителя (НО – направленный ответвитель; БС – балансный смеситель).

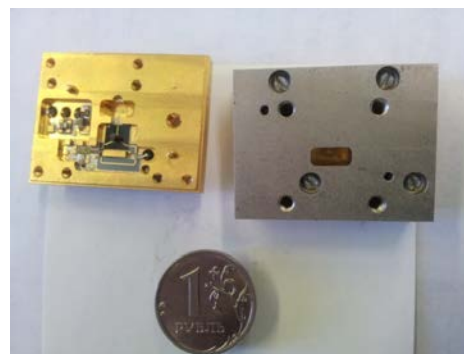


Рис.4 – Внешний вид современного РЛПП 8-мм диапазона длин волн.

прямо пропорциональна излучаемой мощности. Это означает, что ни увеличение, ни уменьшение излучаемой мощности прямого выигрыша в потенциале приемопередатчика не дает. На практике мощность ТТГ выбирается исходя из параметров циркулятора и антенны для обеспечения оптимального режима работы смесителя.

Рассчитаем практически потенциал одноантенного РЛПП 8-мм диапазона. Зададимся значением $\gamma_{\alpha} = -120$ дБ/Гц, $F = 1$ кГц, $L_{прб} = L_{пшг}$, при этом потенциал одноантенного РЛПП в соответствии с (6) составит около 90 дБ.

Это довольно реалистичное значение, неоднократно подтвержденное практически и достаточное для многих применений ближней радиолокации. Но и только. Для перехода к средней дальности необходимо увеличивать потенциал как минимум на 60...80 дБ. Какие же для этого есть возможности?

На Рис. 3, показана структурная схема, а на Рис. 4 приведен внешний вид приемопередающего модуля разработанного в 2010 году. Этот РЛПП схемотехнически отличается наличием балансного смесителя (БС), на который сигнал транзисторного ТТГ поступает через направленный ответвитель (НО). Сигнальный и гетеродинный тракты в этой схеме разделены, что позволяет их оптимизировать по отдельности. Подстройка фазы гетеродинного сигнала частично компенсирует амплитудные шумы, просачивающиеся на вход балансного смесителя. В сочетании с более высокой эффективностью балансного смесителя данная модернизация дает прибавку потенциала на уровне 10 - 15 дБ. Дальнейшее увеличение потенциала одноантенного РЛПП непрерывного режима проблематично. Как увеличению мощности, так и повышению чувствительности РЛПП препятствует просачивающийся на вход приемника сигнал передатчика. Соответственно, ни усилитель мощности на выходе, ни входной малошумящий усилитель в данном случае неприменимы. По тем же причинам усложнение схемы и конструкции РЛПП, связанное с улучшением чувствительности посредством введения второго преобразования частоты, неэффективно.

У одноантенных РЛПП, несмотря на их не слишком высокие параметры есть свои определенные ниши применения. Кроме традиционного использования в промышленности и на транспорте они могут найти применение также и в радиометеорологии. В первую очередь речь идет о датчиках малого радиуса действия, работающих на дальностях от единиц до десятков метров. Их надежность, малые габариты и невысокая стоимость позволяют использовать их в

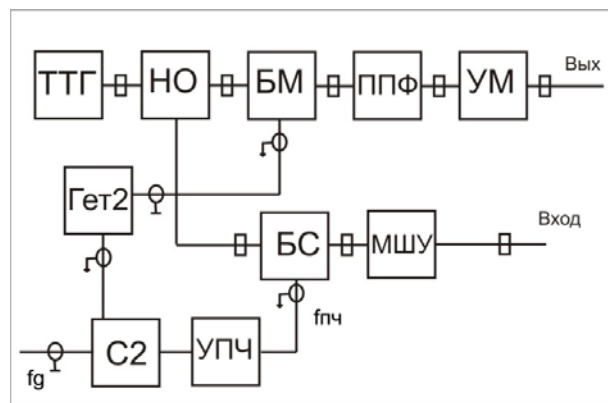


Рис.5 – Структурная схема двухантенного РЛПП (БМ – балансный модулятор; ППФ – полосно-пропускающий фильтр; Гет2 – 2-й гетеродин; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; C2 – второй смеситель)



Рис. 6 – Внешний вид радиолокатора непрерывного режима 8-мм диапазона длин волн.

самых неблагоприятных условиях проведения измерений. Это открывает ранее недоступные возможности, вплоть до исследований, связанных с разрушением или утратой аппаратуры.

Недостаток энергетического потенциала, который может ощущаться в некоторых метеорологических приложениях [9], может быть частично скомпенсирован продвижением вверх по частоте в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн, где отражающая способность атмосферы существенно возрастает [7].

Двухантенные РЛПП. Существенный прирост потенциала РЛПП непрерывного режима можно получить только в двухантенном варианте. Фундаментальным пределом здесь становится чувствительность по Найквисту, определяемая тепловыми шумами. Приемная и передающая антенны должны быть разделены физически и развязаны для выполнения следующих условий: мощность сигнала передатчика не должна вводить приемник в амплитудное ограничение; амплитудные шумы передатчика, просачивающиеся на вход приемника не должны превышать тепловых шумов последнего.

Структурная схема двухантенного РЛПП с двойным преобразованием частоты приведена на Рис.5. Физический механизм возрастания чувствительности при использовании промежуточной частоты связан с существенным сдвигом частоты первого гетеродина при приеме отраженного от цели сигнала. Значение первой промежуточной частоты выбирается таким, чтобы вклад амплитудных шумов гетеродинного генератора при приеме сигнала был минимален и не превышал Найквистовых шумов. В таком приближении аналитическое выражение для Π_2 - энергетического потенциала двухантенного РЛПП с двойным преобразованием частоты приобретает вид:

$$\Pi_2 = \frac{P_{\text{прд}}}{kT_0 \Delta f K_{\text{ш}}} \quad (7)$$

где: $K_{\text{ш}}$ – коэффициент шума приемника.

Внешний вид радиолокатора непрерывного режима, применяемого для повышения безопасности полетов авиации в районе аэропорта [8] показан на Рис.6. Принимая $K_{\text{ш}} = 4$ дБ, получаем $P_{\text{пр мин}} = -170$ дБВт, следовательно при $P_{\text{вых}} = 0$ дБВт потенциал РЛПП составит $\Pi_2 = 170$ дБ. На этой базе уже можно строить широкий спектр радиолокаторов средней дальности и, в частности, метеолокаторы и измерители профиля ветра по высоте. Конечно, реализация таких значений потенциала требует тщательности даже в двухантенном варианте построения РЛПП. Основные проблемы связаны с обеспечением необходимой развязки между антеннами на уровне около 50 - 60 дБ и с мощными отражениями из ближней зоны. Эксперименты [8] показывают, что зачастую отражения от объектов ближней зоны приводят к существенному снижению потенциала за счет ухудшения чувствительности из-за компрессии сигнала и связанных с этим нелинейных искажений.

Проектирование высокочувствительной радиометеорологической аппаратуры требует использования всех возможностей современной элементной базы по достижению максимального мгновенного динамического диапазона, как аналоговых приемных трактов, так и цифровых оконечных устройств. Актуальные значения этого параметра лежат в пределах 80 -100 дБ. Данные значения позволяют в полной мере реализовывать высокий энергетический потенциал двухантенных РЛПП непрерывного режима при измерении параметров атмосферных процессов.

Среди вариантов применения подобной техники хотелось бы отметить задачи высокоточных измерений параметров движущихся объектов, включая измерения микроструктуры рассеивающих частиц разреженных рассеивающих сред [9], а также оценку динамики рассеивающих сред с использованием методов доплеровской томографии [10, 11].

Заключение. Энергетический потенциал РЛПП определяет область их возможного применения. Простые одноантенные СВЧ-приемопередатчики с невысокими параметрами нашли промышленное применение в самых различных системах ближней радиолокации: в безопасности, энергетике, на транспорте и т.п. [6]. Технология их изготовления постоянно совершенствуется, конструкция упрощается. Стоит ожидать, что радиолокационные датчики СВЧ в недалеком будущем достигнут потребительских качеств, обеспечивающих им широкое применение в малобюджетных приложениях.

Двухантенные РЛПП, позволяющие наиболее полно реализовать возможности твердотельных приборов СВЧ сейчас переживают вторую молодость. Как отмечалось выше, они применяются в аппаратуре для научных исследований, военной и специальной технике. Перспективы их широкого применения также просматриваются. Особенно это относится к миллиметровому и субмиллиметровому диапазонам длин волн, где размеры антенн могут быть существенно уменьшены, а достижение высокого энергетического потенциала чрезвычайно актуально.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белоцерковский Г.Б.**, Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М., «Сов. радио», 1975, 336 с.
2. **Доценко В.Д., Осипов М. В., Хлусов В.И.**, Повышение энергетического потенциала РЛС. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Доклады ТУСУРА №1 (23), июнь 2011, стр.29-33.
3. **Скосярев В.Н., Усачев В.А.**, Технический путь повышения энергетического потенциала радиолокаторов. Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана, спецвыпуск «Антенны и устройства радио и оптического диапазона» с.78-83.
4. **Скосярев В.Н.**, Повышение информативности радиолокационных систем на основе технологий широкополосных сигналов, «Журнал радиоэлектроники» №7, 2012.
5. **Парилов В.А. и др.**, Радиолокационные датчики скорости 8-мм диапазона для транспорта. Достижения и перспективы. Электронная техника, сер.1, СВЧ-техника, вып.1 (471), 1998, с. 55-56.
6. **Королев А.Н.**, Работы ГНПП «Исток» в области ближней радиолокации. Электронная техника, сер.1, СВЧ-техника, вып.1 (471), 1998, с. 3-18.
7. **Горелик А.Г., Стерлядкин В.В.**, Доплеровская томография в метеорологии. Изв. АН СССР, ФАО. 1990, №1, с. 47-54.
8. **Горелик А.Г., Стерлядкин В.В.**, Определение ветра в пограничном слое атмосферы с помощью непрерывных доплеровских систем. Метеорология и гидрология. 1984 №4 с.46-52.
9. **Коломиец С.Ф., Якубович Я.В.**, Изучение средствами активной радиолокации конвективной облачности на начальной стадии развития и параметров рассеивателей в пограничном слое атмосферы. Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника", вып. 171, 2011.
10. **Горелик А.Г., Коломиец С.Ф., Куприянов П.В.**, Форма спектра рассеянного поля как источник информации о рассеивающей среде и протекающих в ней динамических процессах. Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника", вып. 176, 2012 - с. 18.
11. **Горелик А.Г., Чистовский К.Г.**, " Применение миллиметровой доплеровской радиолокации (НДР) для повышения безопасности полётов авиации в районе аэропорта". Научный вестник МГТУ ГА №107, 2006. Серия "Радиофизика и радиотехника".

ENERGY POTENTIAL OF SOLID STATE CW-MICROWAVE TRANCEIVERS

Gorelik A. G., Petrov S. N., Kolomiets S. F., Krivoruchko V. I., Kupriyanov P. V.

The main parameters and block diagrams of CW-microwave transceivers are considered. The advisability of leading in conception of energy potential is founded. Qualitative assessment of three ways of CW-microwave transceivers composing is done. The some features for application of CW-microwave transceivers are discussed.

Key words: CW radar transceiver, microwave, energy potential, dynamic range.

REFERENCES

1. Belotserkovskiy G.B., Osnovy radiolokatsii i radiolokatsionnye ustroystva. M., «Sov. radio», 1975, 336 s.
2. Dotsenko V.D., Osipov M. V., Hlusov V.I., Povyshenie energeticheskogo potentsiala RLS. Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'. Doklady TUSURA №1 (23), iyun' 2011, str.29-33.
3. Skosyrev V.N., Usachev V.A., Tekhnicheskii put' povysheniya energeticheskogo potentsiala radiolokatorov. Vestnik MGTU im.N.E.Baumana, spetsvypusk «Antenny i ustroystva radio i opticheskogo diapazona» s.78-83.
4. Skosyrev V.N., Povyshenie informativnosti radiolokatsionnykh sistem na osnove tekhnologiy shirokopolosnykh signalov, «ZHurnal radioelektroniki» №7, 2012.
5. Parilov V.A. i dr., Radiolokatsionnye datchiki skorosti 8-mm diapazona dlya transporta. Dostizheniya i perspektivy. Elektronnaya tekhnika, ser.1, SVCH-tekhnika, vyp.1 (471), 1998, s. 55-56.
6. Korolev A.N., Raboty GNPP «Istok» v oblasti blizhney radiolokatsii. Elektronnaya tekhnika, ser.1, SVCH-tekhnika, vyp.1 (471), 1998, s. 3-18.
7. Gorelik A.G., Sterlyadkin V.V., Doplerovskaya tomografiya v meteorologii. Izv. AN SSSR, FAO. 1990, №1, s. 47-54.
8. Gorelik A.G., Sterlyadkin V.V., Opredelenie vetra v pogranichnom sloe atmosfery s pomoshch'yu nepre-ryvnykh doplerovskikh sistem. Meteorologiya i gidrologiya. 1984 №4 s.46-52.
9. Kolomiets S.F., Yakubovich YA.V., Izuchenie sredstvami aktivnoy radiolokatsii konvektivnoy oblachnosti na nachal'noy stadii razvitiya i parametrov rasseivateley v pogranichnom sloe atmosfery. Nauchnyy vestnik MGTU GA, Seriya "Radiofizika i elektronika", vyp. 171, 2011.
10. Gorelik A.G., Kolomiets S.F., Kupriyanov P.V., Forma spektra rasseyannogo polya kak istochnik informatsii o rasseivayushchey srede i protekayushchih v ney dinamicheskikh protsessah. Nauchnyy vestnik MGTU GA, Seriya "Radiofizika i elektronika", vyp. 176, 2012 - s. 18.
11. Gorelik A.G., Chistovskiy K.G., "Primenenie millimetrovoy doplerovskoy radiolokatsii (NDR) dlya povysheniya bezopasnosti polyotov aviatsii v rayone aeroporta". Nauchnyy vestnik MGTU GA №107, 2006. Seriya "Radiofizika i radiotekhnika".

Сведения об авторах

Горелик Андрей Габриэлович, 1931 г.р., окончил Горьковский государственный университет (1954) году, доктор физико-математических наук, профессор, автор более 150 научных работ, область научных интересов – дистанционное зондирование атмосферы методами пассивной и активной радио- и оптической локации, обработка сложных сигналов.

Коломиец Сергей Федорович, 1971 г.р., к.ф.м.н., научный сотрудник МФТИ, автор более 25 научных работ, область научных интересов – радиолокационная метеорология, статистическая радиофизика и электродинамика.

Криворучко Виктор Иванович, 1961 г.р., окончил ДГУ, автор более 40 научных работ, область научных интересов - радиометрия, техника миллиметрового диапазона.

Куприянов Павел Васильевич, 1964 г.р. окончил Таганрогский РТИ, доктор технических наук, автор более 30 научных работ, область научных интересов – широкополосные приемные устройства СВЧ инфрадинного типа, пассивная и активная радиолокация, техника миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Петров Сергей Александрович, 1986 г.р. окончил МИРЭА, автор научных работ по широкополосным инфрадинным приемным устройствам и радиолокационным приемопередающим модулям СВЧ.