

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.6>

УДК: 621.396.669

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЕРЕОТРАЖЕННОГО ОТ ПОВЕРХНОСТИ РАДИОСИГНАЛА КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

В.В. Осипов¹, С.С. Савилкин², А.В. Сухов², В.И. Филатов³

- ¹ Центр визуализации и спутниковых информационных технологий, НИИ Системных исследований РАН, 117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1
² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,
³ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Статья поступила в редакцию 19 июня 2024 г.

Аннотация. Для оценки возможности обнаружения радиосигнала существуют известные модели, позволяющие учитывать прямое распространение радиоволн. При этом современные средства радиоприемных устройств позволяют производить фиксацию функционирования радиоэлектронных средств на столь малых уровнях шумов, что в некоторых случаях могут с высокой вероятностью обнаруживать сигналы не прямого излучения. Эта задача является наиболее приоритетной в целях поиска источника радиоизлучения и последующей классификации радиоэлектронного средства по анализу характеристик принимаемого сигнала.

Ключевые слова: математическая модель обнаружения излучения, подстилающая поверхность.

Финансирование: Публикация выполнена в рамках НИР ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0003.

Автор для переписки: Савилкин Сергей Сергеевич, Savilkin@mail.ru

Введение

Для решения задачи оценки вероятности обнаружения радиосигналов всевозможных радиоэлектронных средств (РЭС), функционирующих с использованием направленных на поверхность антенн, сигналы которых отражаются от подстилающей поверхности, необходимо учитывать параметры приемных средств фиксации и анализа радиосигналов, электродинамические свойства подстилающей поверхности, а также свойства передатчиков самого РЭС с параметрами его антенны. Решение таких задач в целом разумно рассматривать в виде последующих этапов.

1. Основные исходные данные для моделирования

На начальном этапе необходимо определим основные параметры РЭС, условия распространения радиосигнала, свойства подстилающей поверхности и приемного средства фиксации и анализа радиосигнала.

Для РЭС:

- несущая частота сигнала f , Гц;
- скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с;
- высота расположения РЭС относительно поверхности h_1 , м;
- направление излучения главного максимума диаграммы направленности антенны РЭС α , град;
- ширина диаграммы направленности главного лепестка РВ $\varphi_{0.5}$, град:
 - в продольной плоскости – $\varphi_{10.5}$;
 - в поперечной плоскости – $\varphi_{20.5}^\circ$;
- мощность излучения РЭС – P_u ;
- коэффициент усиления антенны РЭС $G_{пер}$, дБ;
- среднее значение периода следования импульсов – T_u , с.

Для поверхности переотражения радиосигналов:

- радиус Земли $R_3 = 6371$ км;
- эквивалентный радиус Земли $R_3 = 8500$ км;
- относительная диэлектрическая проницаемость и электрическая проводимость для рассматриваемых типов поверхности:
 - сухая почва $\varepsilon = 5$, $\sigma = 10^{-4}$ См/м;
 - мерзлая почва $\varepsilon = 6$, $\sigma = 10^{-3}$ См/м;
 - снег $\varepsilon = 2$, $\sigma = 10^{-2}$ См/м;
 - морская вода $\varepsilon = 80$, $\sigma = 4$ См/м.

При этом наличием на радиотрассе гидрометеообразований (дождь или туман) будем пренебрегать, поскольку степень влияния на учитываемые радиосигналы данных факторов невелика.

Для приемного средства фиксации и анализа радиосигналов:

- высота относительно поверхности H , км;
- коэффициент усиления приемной антенны G_{np} , дБ;
- чувствительность $P_{чув}$, дБ.

2. Математическое моделирование переотраженного сигнала

Проведем расчет длины волны сигнала и волнового числа (1) и (2):

$$\lambda = \frac{c}{f}, \text{ м,} \quad (1)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2)$$

Определим представление поля падающей волны. Для этого рассчитаем отношение значения расстояния от РЭС до поверхности к длине волны $\frac{h_{кр}}{\lambda}$.

В случае если данное отношение $\frac{h_1}{\lambda} \leq 1$, волну необходимо считать сферической. В подавляющем большинстве случаев выполняется условие $\frac{h_1}{\lambda} \gg 1$,

при котором падающую волну можно считать плоской. Затем необходимо определить параметр шероховатости поверхности по критерию Релея [2]:

$$h < \frac{\lambda}{8\sin(\varepsilon)}, \text{ м,} \quad (3)$$

где ε – угол скольжения, $\varepsilon = 90^\circ - \theta$, h расстояние между самой высокой и низкой точками профиля поверхности отражения радиоволн РЭС (просвет).

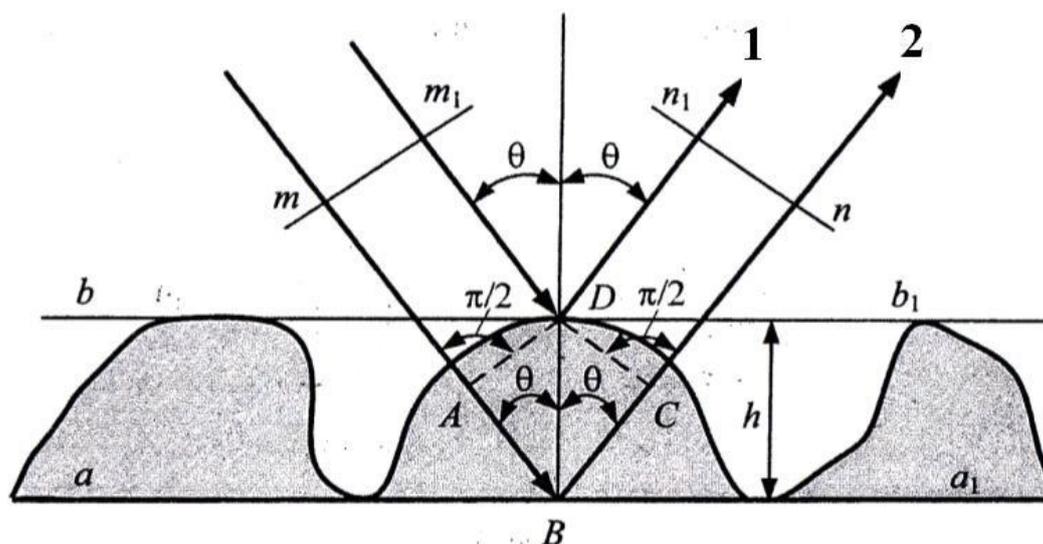


Рис. 1. определение степени шероховатости поверхности.

Таким образом, по данному критерию гладкую поверхность можно рассматривать, например, в случае использования радиоволн метрового диапазона при функционировании РЭС над морской поверхностью во время штиля или слабого волнения, над ровным снежным покровом, гладкими широкими грунтовыми дорогами, а также асфальтовыми или бетонными покрытиями [3].

В случае, если поверхность необходимо рассматривать как шероховатую, то модель отражения можно рассматривать в виде эквивалентного излучателя со сферической поверхностью. При этом диаграмма направленности будет представлять собой кардиоиду [4]:

$$F(\varphi) = 2a(1 - \cos(\varphi)). \quad (4)$$

Особенностью данной диаграммы является то, что переотражение сигнала можно практически рассматривать как изотропное. При этом единственным ограничением на возможность обнаружения такого сигнала будет являться

значения углов полного отражения от ионосферы (угол Брюстера) и величин наклонных дальностей.

В случае, если поверхность считать гладкой, необходимо рассматривать зеркальное отражение с учетом потерь части энергии сигнала, вызванное поглощением, и, как следствие, учитывать ширину диаграммы обратного отражения, равную ширине диаграммы направленности антенны.

Рассчитываем углы полного отражения и поглощения по формулам:

- угол полного поглощения [2]:

$$\varphi_B = \arcsin \left(\frac{\sqrt{1 - \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)^2}} \right); \quad (5)$$

- угла полного отражения [2]:

$$\varphi_{кр} = \arcsin \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \right). \quad (6)$$

С учетом электродинамических параметров среды падения радиоволн, представляющую собой воздух ($\varepsilon_e = 1, \mu_e = 1$) и данных с электродинамическими параметрами поверхностей, получим сводные данные, представленные в таб. 1.

Таблица 1. Значения электрических параметров некоторых видов земной поверхности в диапазоне радиоволн.

Вид земной поверхности	угол полного поглощения, φ_B , град	угол полного отражения, $\varphi_{отр}$, град
Морская вода	84	90
Пресная вода рек и озер	73	90
Влажная почва	60	90
Сухая почва	60	90
Снег ($t = -10^\circ$)	45	90
Армированный бетон	50	90
Лед ($t = -10^\circ$)	63	90

В дальнейшем полученные значения для φ_B различных поверхностей необходимо сравнить с половиной ширины диаграммы направленности антенны.

В случае, если $\varphi_B > \frac{\varphi_{0.5}}{2}$, то граничные значения отражения диаграммы направленности будут соответствовать $\frac{\varphi_{0.5}}{2}$, в противном случае границы углов отражений диаграммы направленности будут ограничены величиной φ_B :

$$\Theta_{\text{отр}} = \begin{cases} \frac{\varphi_{0.5}}{2}, & \text{если } \varphi_B > \frac{\varphi_{0.5}}{2} \\ \varphi_B, & \text{иначе} \end{cases}.$$

В статье рассматривается случай гладкой поверхности, как более сложный для обнаружения отраженных от поверхности сигналов.

Далее произведем расчет коэффициента наклонной дальности [5,6]:

$$\gamma = \frac{R_3}{R_3 + H_{KA}}. \quad (7)$$

Проводим определение комплексной диэлектрической проницаемости на основании выражения [5,6]:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - i60\lambda\sigma, \quad (8)$$

где λ – длина волны передающей антенны в свободном пространстве; ε , σ – соответственно относительная проницаемость поверхности Земли и ее электрическая проводимость.

Произведем расчет комплексного коэффициента отражения [2]:

$$R(\tilde{\varepsilon}, \theta) = \frac{\tilde{\varepsilon} \cdot \cos(\theta) - \sqrt{\tilde{\varepsilon} - (\sin(\theta))^2}}{\tilde{\varepsilon} \cdot \cos(\theta) + \sqrt{\tilde{\varepsilon} - (\sin(\theta))^2}}, \quad (9)$$

где ε – соответственно относительная проницаемость поверхности; θ – сектор изменения угла между перпендикуляром к поверхности и прямой, соединяющей участок поверхности отражения и приемное средство фиксации и анализа радиосигнала.

На рис. 2 представлены результаты расчетов коэффициентов отражения для различных типов поверхностей в условиях вертикального излучения РЭС на поверхность при ширине диаграммы направленности, равной 70 градусов.

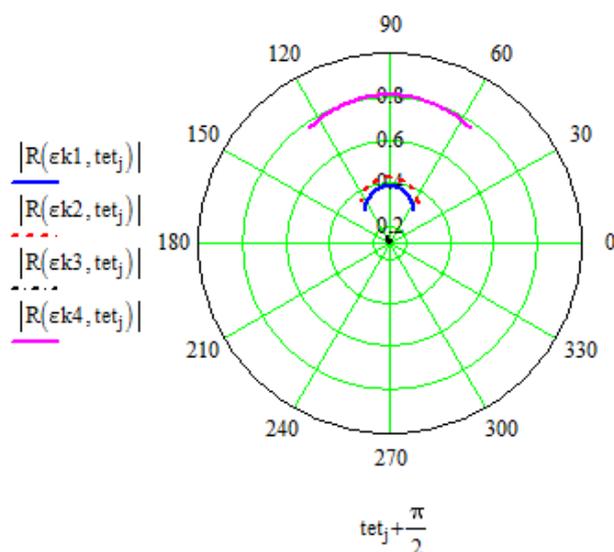


Рис. 2. Модуль коэффициента отражения для углов.

Далее необходимо рассчитать наклонную D_H дальность [5,7]:

$$D_H = \sqrt{R_3^2 + (R_3 + H_{np})^2 - 2R_2(R_3 + H_{np})\cos\beta_0}, \text{ км}, \quad (10)$$

где β_0 – геоцентрический угол между подспутниковой точкой приемника и точкой расположения РЭС, град, рассчитываемый по формуле [5,7]:

$$\beta_0 = \arccos[\sin\varphi_{nep} \cdot \sin\varphi_{np} + \cos\varphi_{nep} \cdot \cos\varphi_{np} \cdot \cos(\Psi_{nep} - \Psi_{np})], \text{ град.} \quad (11)$$

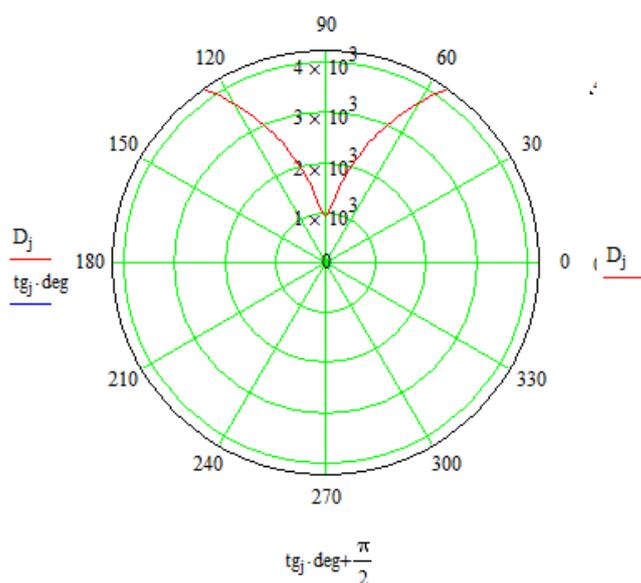


Рис. 3. Наклонная дальность отражения сигнала РЭС от подстилающей поверхности.

В формуле (11) восточная долгота и северная широта используются со знаком «плюс», а западная долгота и южная широта – со знаком «минус».

Величина ослабления радиосигнала на трассе определим по формуле [7, 8]:

$$Z = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d, \text{ дБ.} \quad (12)$$

Далее произведем расчет мощности излучения радиосигнала с меняющейся наклонной дальностью с учетом направленных свойств антенны приемника для изменяющихся углов:

$$P_C = \frac{P_{comp} \cdot G_{nep} \cdot G_{np} \cdot \lambda^2}{16\pi^2 \cdot d^2} \cdot |R(\varepsilon, \theta)|^2. \quad (13)$$

В табл. 2 представлены рассчитанные значения мощности принимаемы сигналов. С учетом меняющейся наклонной дальности.

Таблица 2. Мощность излучения сигнала с меняющейся наклонной дальностью.

Угол φ , градусы	Мощность сигнала, Вт	Угол φ , градусы	Мощность сигнала, Вт
90°	6.434*10 ⁻⁸	108°,72°	9.672*10 ⁻⁹
91°,89°	6.32610 ⁻⁸	109°,71°	8.797*10 ⁻⁹
92°,88°	6.02210 ⁻⁸	110°,70°	8.027*10 ⁻⁹
93°,87°	5.576*10 ⁻⁸	111°,69°	7.347*10 ⁻⁹
94°,86°	5.052*10 ⁻⁸	112°,68°	6.744*10 ⁻⁹
95°,85°	4.506*10 ⁻⁸	113°,67°	6.207*10 ⁻⁹
96°,84°	3.981*10 ⁻⁸	114°,66°	5.727*10 ⁻⁹
97°,83°	3.498*10 ⁻⁸	115°,65°	5.297*10 ⁻⁹
98°,82°	3.067*10 ⁻⁸	116°,64°	4.91*10 ⁻⁹
99°,81°	2.691*10 ⁻⁸	117°,63°	4.561*10 ⁻⁹
100°,80°	2.366*10 ⁻⁸	118°,62°	4.244*10 ⁻⁹
101°,79°	2.087*10 ⁻⁸	119°,61°	3.957*10 ⁻⁹
102°,78°	1.848*10 ⁻⁸	120°,60°	3.695*10 ⁻⁹
103°,77°	1.642*10 ⁻⁸	121°,59°	3.455*10 ⁻⁹
104°,76°	1.466*10 ⁻⁸	122°,58°	3.236*10 ⁻⁹
105°,75°	1.313*10 ⁻⁸	123°,57°	3.035*10 ⁻⁹
106°,74°	1.182*10 ⁻⁸	124°,56°	2.85*10 ⁻⁹
107°,73°	1.067*10 ⁻⁸	125°,55°	2.679*10 ⁻⁹

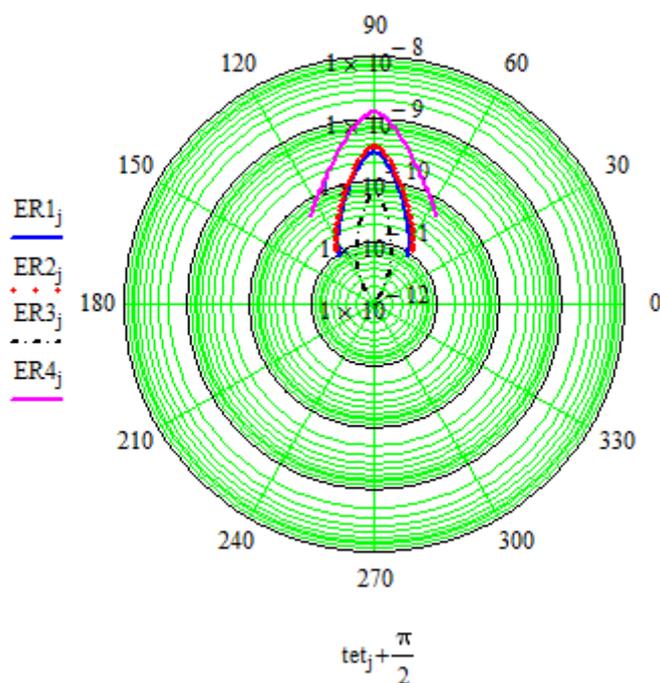


Рис. 4. Мощность сигнала (Вт) на входе приемника в зависимости от угла.

3. Расчет вероятности обнаружения радиосигнала

Тогда, вероятность обнаружения сигнала РЭС рассчитаем по формуле [7]:

$$P_e = \Phi\left(\frac{3,16q - 4,3}{\sqrt{1+q}}\right), \quad (14)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ – интеграл вероятности; q – отношение сигнал/шум на входе приемного устройства;

В результате расчетов были получены оценки вероятностей обнаружения отраженных от поверхностей сигналов с учетом типов поверхностей, параметров сигналов и ширины диаграммы направленности, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Результаты оценки вероятности обнаружения отраженного от сухой почвы сигнала.

Угол φ , градусы	Вероятность обнаружения	Угол φ , градусы	Вероятность обнаружения
90°	1	108°,72°	0,02
91°,89°	1	109°,71°	$8,717 * 10^{-3}$
92°,88°	1	110°,70°	$3,997 * 10^{-3}$
93°,87°	1	111°,69°	$1,947 * 10^{-3}$
94°,86°	1	112°,68°	$1,014 * 10^{-3}$
95°,85°	1	113°,67°	$5,65 * 10^{-4}$
96°,84°	1	114°,66°	$3,363 * 10^{-4}$
97°,83°	1	115°,65°	$2,128 * 10^{-4}$
98°,82°	1	116°,64°	$1,425 * 10^{-4}$
99°,81°	1	117°,63°	$1,003 * 10^{-4}$
100°,80°	0,999	118°,62°	$7,383 * 10^{-5}$
101°,79°	0,983	119°,61°	$5,652 * 10^{-5}$
102°,78°	0,895	120°,60°	$4,478 * 10^{-5}$
103°,77°	0,692	121°,59°	$3,656 * 10^{-5}$
104°,76°	0,436	122°,58°	$3,063 * 10^{-5}$
105°,75°	0,229	123°,57°	$2,624 * 10^{-5}$
106°,74°	0,107	124°,56°	$2,292 * 10^{-5}$
107°,73°	0,046	125°,55°	$2,037 * 10^{-5}$

С учетом данных значений вероятностей обнаружения радиосигналов был построен график, представленный на рис.5.

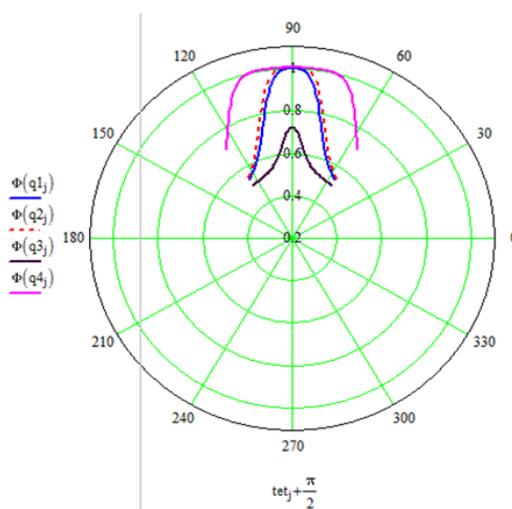


Рис. 5. Вероятность обнаружения РЭС приемником обнаружения и анализа.

Как видно из данного рисунка, после углов 104° и 76° градусов вероятность обнаружения сигнала начинает резко убывать, поэтому данное значение можно рассматривать как граничное для ограничения поверхности целесообразного обнаружения и размещения приемного средства.

С учетом границ вероятности ложной тревоги $F_{лт\text{треб}} \leq 10^{-3}$ необходимо ограничить значения возможных углов обнаружения. Для этого определим границы q вероятности ложной тревоги [1,5]

$$q_{нор} = \sqrt{-2 \cdot \ln(F_{лт\text{треб}})} = 3.717. \quad (15)$$

Тогда, по данному пороговому значению необходимо отсечь те углы отражения, при которых не будет выполняться условие:

$$q \geq q_{нор}.$$

Заключение

Разработанная данная математическая модель позволяет производить оценку вероятности обнаружения отраженного сигнала РЭС от подстилающей поверхности. При этом учитываются различные показатели и условия распространения радиосигнала, электродинамические параметры подстилающей поверхности, а также направленные свойства РЭС.

Финансирование: Публикация выполнена в рамках НИР ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0003.

Литература

1. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учеб. для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – 1983.
2. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн: Учебное пособие. – Высшая школа, 1975.
3. Людвиг В.А. Пассивное противодействие системам наведения высокоточного оружия // М.: ЛЕНАНД. – 2016.
4. Блинова И.В., Попов И.Ю. Кривые, заданные параметрически и в полярных координатах // СПб.: Университет ИТМО. – 2017.
5. Методы и алгоритмы обработки информации в АСУ при обнаружении и сопровождении малоразмерных объектов: Монография. Часть 1. Методы и алгоритмы первичной обработки информации. – Балашиха: ВА РВСН имени Перта Великого, 2021. 246с.
6. Саакян С.О. Оценка возможности обнаружения КРБД средствами космической разведки. Журнал «Стратегическая стабильность» №3(100). – Юбилейный. 2022. С 24-32.
7. Гуляев В.П. Анализ демаскирующих признаков объектов информатизации и технических каналов утечки информации: учебно-методический комплект. – 2014.
8. Рекомендация МСЭ-R МСЭ-R Р.525-4. Расчет ослабления в свободном пространстве (1978-1982-1994-2016-2019).

Для цитирования:

Осипов В.В., Савилкин С.С., Сухов А.В., Филатов В.И. Математическая модель оценки возможности обнаружения переотраженного от поверхности радиосигнала космическими средствами // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.6>